

Verbesserung der teledermatologischen Diagnostik durch die haptisch-visuelle 3D-Repräsentation von Hautarealen

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Lara Schweickart

geb. in Ludwigshafen am Rhein

Tag der mündlichen Prüfung:

17.02.2026

Hauptreferent:

Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork

Korreferentin:

Prof. Dr. med. Astrid Schmieder

Kurzfassung

Die weltweit steigende Prävalenz von Hauterkrankungen stellt die Dermatologie vor eine zunehmende Herausforderung in der adäquaten Versorgung von Patient*innen. Durch den demografischen Wandel in Deutschland wird sich dieser Versorgungsdruck in den kommenden Jahrzehnten weiter verschärfen. Insbesondere bei chronischen Hauterkrankungen ist eine kontinuierliche und qualitativ hochwertige Verlaufskontrolle essenziell, um Krankheitsverläufe und Therapieerfolge zuverlässig beurteilen zu können. Der hohe Betreuungsaufwand bindet jedoch erhebliche Anteile der limitierten personellen Ressourcen dermatologischer Fachkräfte. Teledermatologische Systeme bieten hier ein großes Potenzial, um Dermatolog*innen zu entlasten und die vorhandenen Ressourcen effizienter einzusetzen. Verfügbare teledermatologische Systeme stoßen jedoch in Bezug auf die Diagnosegenauigkeit und das Vertrauen der Dermatolog*innen in die eigene Diagnose an ihre Grenzen. Die Systeme basieren überwiegend auf zweidimensionalen Bildinformationen, wodurch wichtige visuelle und haptische Aspekte der Hautbeschaffenheit unberücksichtigt bleiben.

In dieser Dissertation wird ein neuartiger Ansatz zur Verbesserung der teledermatologischen Diagnostik vorgestellt, der eine 3D-Darstellung der Hautläsionen sowohl visuell als auch haptisch ermöglicht. Basierend auf Videos der Hautläsionen, die durch die Patient*innen aufgenommen werden, werden 3D-Modelle generiert, die eine realitätsnahe Darstellung der Topologie und Beschaffenheit der Haut ermöglichen. Ergänzend wird ein 3D-Ausgabesystem entwickelt, das durch Ultraschall-Phased-Arrays eine 3D-Darstellung der Hautareale erzeugt, die eine haptische Begutachtung ohne physischen Kontakt ermöglicht. Die technische Umsetzung folgt dabei einem nutzendenzentrierten Ansatz, der die Nutzenden in die Kontextanalyse, Anforderungserhebung und iterative Evaluierung miteinbezieht.

Durch die Integration visueller und haptischer 3D-Informationen liefert diese Dissertation einen Beitrag zur Verbesserung der teledermatologischen Diagnostik im Kontext der Versorgung chronischer Hauterkrankungen.

Abstract

The increasing prevalence of skin diseases worldwide poses a growing challenge to dermatology in ensuring adequate patient care. Due to demographic change, this strain on healthcare systems is expected to intensify further in Germany over the coming decades. In particular, for patients with chronic skin conditions, continuous and high-quality examinations are essential to reliably monitor disease progression and therapeutic outcomes. However, the high level of care required places additional pressure on the already limited resources of dermatological specialists. Teledermatological systems offer great potential to support dermatologists and allocate available resources more efficiently. Current systems, however, face limitations regarding diagnostic accuracy and dermatologists' confidence in their assessments. They typically rely on two-dimensional image data, which fails to capture essential visual and haptic characteristics of the skin.

This thesis presents a novel approach to extending teledermatological systems by integrating three-dimensional visual and haptic representations of skin lesions. Based on videos of the skin lesions recorded by the patients, 3D models are generated to provide a realistic depiction of the skin's topology and texture. In addition, a 3D output system is being developed that uses ultrasound phased arrays to generate a 3D representation of the skin areas, enabling haptic assessment without physical contact. The technical implementation follows a user-centered development approach, involving users throughout context analysis, requirements elicitation and iterative evaluation. Through the integration of visual and haptic 3D information, this dissertation contributes to the improvement of teledermatological diagnostics in the context of chronic skin disease care.

Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am FZI Forschungszentrum Informatik und in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV) am Karlsruher Institut für Technologie. In dieser intensiven Phase haben mich viele Menschen auf unterschiedlichste Weise unterstützt, die ich im Folgenden gerne würdigen möchte.

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork danken. Er hat mir nicht nur die Bearbeitung hochrelevanter und zukunftsweisender Themen ermöglicht, sondern mir dabei stets den notwendigen Freiraum für die persönliche und wissenschaftliche Entfaltung gelassen. Besonders geschätzt habe ich seinen Blick für die praktische Anwendung, der mir geholfen hat, den realen Nutzen meiner Forschung nie aus den Augen zu verlieren.

Ebenso möchte ich Prof. Dr. med. Astrid Schmieder herzlich für die Übernahme des Korreferats danken. Ein besonderer Dank gilt ihr und ihrem Team am Universitätsklinikum Würzburg (UKW) – insbesondere Caroline Glatzel, Paul Schöppe und Sandra Wilke – für die großartige Unterstützung in den vergangenen Jahren. Ohne die Möglichkeit, dort umfassende Tests und Umfragen durchzuführen, wäre diese Arbeit in ihrer vorliegenden Form nicht realisierbar gewesen.

Des Weiteren danke ich dem Prüfungsvorsitzenden Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Lemmer sowie den weiteren Prüfern Prof. Dr.-Ing. Mike Barth und Priv.-Doz. Dr.-Ing. Axel Loewe für ihr Interesse an meiner Forschung und die Zeit, die sie in dieses Verfahren investiert haben.

Maßgeblich für den Erfolg und die Freude an der Forschung war mein tägliches Arbeitsumfeld. Mein Dank gilt dem gesamten Forschungsbereich ESS am FZI für

die motivierende Atmosphäre, die vielen konstruktiven Impulse und die Kaffeepausen, die oft die besten Ideen hervorbrachten. Ein herzlicher Dank geht dabei an meine Abteilung MIT, insbesondere an Oliver Werthwein, Dominik Beyer und Dennis Birkenmaier für die unzähligen Diskussionen und die gegenseitige Unterstützung. Auch Julia Konle sowie allen von mir betreuten Studierenden danke ich herzlich für ihren tatkräftigen Einsatz bei der technischen Realisierung der Forschungsergebnisse.

Danke an meine Familie und meine Freund*innen, die immer für mich da waren, mich abgelenkt haben, wenn es nötig war, und mir über die Jahre mit unendlicher Geduld den Rücken freigehalten haben. Von ganzem Herzen möchte ich mich schließlich bei meinem Freund Jacob bedanken. Danke für deinen unerschöpflichen Rückhalt auf allen Ebenen – vom fachlichen Input über das unermüdliche Korrekturlesen bis hin zum gemeinsamen Üben des Vortrags. Ohne dich wäre dieser Weg nicht derselbe gewesen.

Berlin, im März 2026

Lara Schweickart

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Danksagung	v
Abkürzungen und Symbole	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Wissenschaftliches Umfeld	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Medizinische Grundlagen	5
2.1 Psoriasis	5
2.1.1 Diagnose und Schweregrade	6
2.1.2 Therapie	9
2.2 Grundlagen der haptischen Wahrnehmung	10
2.2.1 Mechanorezeptoren	12
2.3 Kennwerte zur Bestimmung der Diagnosegenauigkeit	13
2.4 Erfassung subjektiver Krankheitsmetriken	15
3 Technische Grundlagen	17
3.1 Computer Vision	17
3.1.1 Dreidimensionale Rekonstruktion	18
3.1.2 Saliente Objekterkennung	27
3.1.3 Schwellwertsegmentierung	28

3.1.4	Kantendetektion	29
3.2	Ultraschall	30
3.2.1	Akustischer Strahlendruck	31
3.2.2	Erzeugung von Ultraschall mit Ultraschallwandlern . . .	32
3.2.3	Ultraschall-Phased-Array	33
3.2.4	Modulationsarten	36
3.3	Nutzendenzentrierte Entwicklung	38
3.3.1	Personas	39
3.3.2	User Stories	40
3.3.3	Design for all	40
3.3.4	System Usability Scale	40
4	Stand der Teledermatologie	43
4.1	Übersicht	43
4.2	Bestehende Angebote der Teledermatologie	45
4.2.1	Analyse vorhandener Applikationen	46
4.2.2	Psoriasis-spezifische Applikationen	48
4.3	Diagnosegenauigkeit	49
4.3.1	Einfluss der Informationsqualität auf die Diagnosegenauigkeit	50
4.3.2	Teledermatologische Diagnosen im Vergleich zu histopathologischen Diagnosen	50
4.3.3	Diagnosegenauigkeit bei entzündlichen Hauterkrankungen	51
4.3.4	Sicherheit der Dermatolog*innen im Umgang mit Teledermatologie	51
4.3.5	Diagnosegenauigkeit im Zeitverlauf	52
4.4	Potenziale und Limitationen teledermatologischer Technologien	53
5	Konzeption eines teledermatologischen Systems zur visuell-haptischen 3D-Darstellung	57
5.1	Systemidee	57
5.2	Entwicklungsansatz	58
5.3	Anforderungsanalyse	58
5.3.1	Personas	61
5.3.2	User Stories	65

5.3.3	Anforderungskatalog	67
5.4	Konzeptentwicklung	73
5.4.1	App für die Patient*innen zur Datenaufnahme	74
5.4.2	Backend zur Datenverarbeitung	76
5.4.3	Dashboard für die Dermatolog*innen zur Datenvisualisierung	78
5.4.4	Visuelle 3D-Darstellung	80
5.4.5	Haptische 3D-Darstellung	81
5.4.6	Gesamtsystem	82
6	Systemische Umsetzung der Datenaufnahme, -verarbeitung und -visualisierung	85
6.1	Nutzbarkeits-Betrachtung für die Frontend-Entwicklung	85
6.1.1	Farbkonzept und Schriftart	86
6.1.2	Technologieauswahl	87
6.2	Datenaufnahme	87
6.2.1	Workflow	88
6.2.2	Auswahl der Fragebögen	89
6.3	Datenverarbeitung	90
6.3.1	Fotoaufbereitung	90
6.3.2	Score-Berechnung	93
6.4	Datenvisualisierung	94
6.4.1	Bedienoberfläche und Navigation	97
7	Generierung und Darstellung von 3D-Hautmodellen aus Smartphone-Videos	99
7.1	Pipeline zur 3D-Modellierung	99
7.2	Vorverarbeitung	101
7.3	Kalibrierung	101
7.4	Fotorealistische 3D-Modellierung	103
7.4.1	Poisson Surface Reconstruction	103
7.4.2	Neural Radiance Field	103
7.4.3	Gaussian Splatting	105
7.5	Visuelle Darstellung der generierten 3D-Modelle	106
7.6	Integration in das Gesamtsystem	107

8	Entwicklung des haptischen 3D-Ausgabesystems	109
8.1	Technologieauswahl	109
8.2	Aufbau des Ultraschall-Phased-Arrays	111
8.2.1	Optimierung des Ultraschall-Phased-Arrays	113
8.3	Software zur Ansteuerung des Ultraschall-Phased-Arrays	118
8.3.1	Konzeptionierung der Software-Architektur	118
8.3.2	Implementierung der Software	119
8.4	Integration in das Gesamtsystem	129
9	Evaluierung	131
9.1	Evaluierung der 3D-Modellierung	131
9.1.1	Quantitative Bewertung der generierten 3D-Modelle	131
9.1.2	Qualitative Bewertung: Eignung für die Teledermatologie	134
9.1.3	Bewertung der Nutzbarkeit	137
9.2	Evaluierung der haptischen 3D-Darstellung	138
9.2.1	Phase I: Evaluierung der Genauigkeit	138
9.2.2	Phase II: Evaluierung der Nutzbarkeit	144
9.2.3	Phase III: Stress-Tests	145
9.3	Evaluierung der Nutzbarkeit der Frontends	146
9.3.1	Ergebnisse der Evaluierung der Patient*innen-App	147
9.3.2	Ergebnisse der Evaluierung des Dermatolog*innen-Dashboards	148
9.4	Erfüllung der Anforderungen	149
9.4.1	Patient*innen-App	149
9.4.2	Dermatolog*innen-Dashboard	150
9.4.3	3D-Modellierung	152
9.4.4	Visuelle 3D-Darstellung	152
9.4.5	Haptische 3D-Darstellung	153
9.5	Diskussion der Ergebnisse	155
9.6	Erkenntnisse im Kontext der Forschungsfragen	157
10	Zusammenfassung und Ausblick	161
10.1	Zusammenfassung	161
10.2	Ausblick	163
A	Anhang	165

A.1	Fragebögen	165
A.1.1	Fragebogen zur Erfassung des Hautbefindens	165
A.1.2	Fragebogen zur Erfassung der Lebensqualität (DLQI)	167
A.1.3	SUS-Fragebogen	169
A.1.4	Fragebogen zur Evaluierung der 3D-Modelle und visuellen 3D-Darstellung	170
A.1.5	Eingangs-Fragebogen zur Evaluierung der haptischen 3D-Darstellung	174
A.1.6	Eingangs-Fragebogen zur Evaluierung der Nutzbarkeit der Patient*innen-App	176
A.1.7	Fragebogen zur Evaluierung der Patient*innen-App	177
A.1.8	Eingangs-Fragebogen zur Evaluierung des Dermatolog*innen-Dashboards	179
A.1.9	Fragebogen zur Evaluierung des Dermatolog*innen-Dashboards	180
A.2	Ergebnisse der Literaturrecherche zur Diagnosegenauigkeit in der Teledermatologie	182
A.3	Detaillierte Beschreibung des Testaufbaus der Evaluierung der haptischen 3D-Darstellung	186
A.3.1	Phase I: Evaluierung der Genauigkeit	186
A.4	Proband*innen der Evaluierung	190
A.4.1	Evaluierung Patient*innen-App und Dermatolog*innen-Dashboard	190
Abbildungsverzeichnis		193
Tabellenverzeichnis		197
Eigene Veröffentlichungen		199
Betreute Abschlussarbeiten		201
Literaturverzeichnis		203

Abkürzungsverzeichnis

BSA	Body Surface Area
DLQI	Dermatologischer Lebensqualitäts-Index
FZI	FZI Forschungszentrum Informatik
HED	Holistically-Nested Edge Detection
InSPyReNet	Inverse Saliency Pyramid Reconstruction Network
L-PIPS	Learned Perceptual Image Patch Similarity
MSE	mean squared error
MVS	Multi-View Stereo
NeRF	Neural Radiance Fields
PASI	Psoriasis Area and Severity Index
PROMs	Patient-Reported Outcome Measures
PROs	Patient-Reported Outcomes
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio
PSR	Poisson Surface Reconstruction
RANSAC	Random Sample Consensus
SfM	Structure-from-Motion
SOD	saliente Objekterkennung

SSIM	Structural Similarity
SUS	System Usability Scale
UKW	Universitätsklinikum Würzburg
UMM	Universitätsklinikum Mannheim
UPA	Ultraschall-Phased-Array

1 Einleitung

1.1 Motivation

Seit 1980 ist ein deutlicher Anstieg der Prävalenz von Hautkrankheiten zu verzeichnen, insbesondere chronische Hauterkrankungen wie Psoriasis und atopische Dermatitis sind davon betroffen. Globale Analysen zeigen eine Zunahme von über 80 % bei Psoriasis-Erkrankungen in den letzten 30 Jahren [1]. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und lassen sich unter anderem auf die alternde Bevölkerung, veränderte Umweltfaktoren durch den Klimawandel sowie den Wandel der Lebensstile zurückführen [2].

Dieser steigenden Krankheitslast steht ein steigender Fachkräftemangel im Gesundheitswesen gegenüber. Die *Organisation for Economic Co-operation and Development* schätzte den Mangel an Fachpersonal im Gesundheitswesen in Europa 2023 auf ca. 1,2 Millionen Stellen [3]. Dieser Mangel wird sich durch den demografischen Wandel weiter verstärken, was zu wachsenden Engpässen in der Versorgung und langen Wartezeiten führen wird.

Eine mögliche Lösung, um den beschriebenen Problemen entgegenzuwirken, ist die Telemedizin. Ziel der Telemedizin ist es, durch ein digitales Angebot die Anzahl der Vor-Ort-Termine zu verringern und somit die ärztlichen Ressourcen zu schonen. Zusätzlich kann eine bessere Abdeckung der Versorgung, auch in abgelegenen Regionen, erreicht werden und im Allgemeinen die Belastung von Ärzt*innen und Patient*innen verringert werden.

Dermatologie ist aufgrund der sichtbaren Natur von Hautkrankheiten für dieses Fernbehandlungsmodell besonders geeignet. Teledermatologie ermöglicht es Dermatolog*innen diagnostische Bilder von Hautkrankheiten zusammen mit der

Krankheitsgeschichte aus der Ferne zu betrachten und auf dieser Basis Diagnosen zu stellen und Behandlungsempfehlungen auszusprechen. [4]

Die Teledermatologie hat sich als wichtiges Instrument zur Verbesserung des Zugangs zu einer hochwertigen dermatologischen Versorgung erwiesen [5]. Vor allem im Bereich der Behandlung von chronischen Hauterkrankungen, wie Psoriasis, kann die Teledermatologie gewinnbringend eingesetzt werden, um Kontrolltermine auf den individuellen Krankheitsverlauf anzupassen und so die limitierten Ressourcen der Dermatolog*innen sinnvoll zu verteilen [6].

Viele Studien zeigen aber auch, dass die teledermatologischen Diagnosen nur in 70 % bis 80 % der Fälle mit den Vor-Ort-Diagnosen oder histologischen Befunden übereinstimmen [7]. Die Diagnosegenauigkeit ist stark von der Qualität der genutzten Daten, insbesondere der Auflösung der diagnostischen Bilder abhängig. So ist das Vertrauen der Dermatolog*innen in die eigene Ferndiagnose oft gering und liegt in verschiedenen Studien unter 60 %. [8]

Für die dermatologische Diagnose darf der Einfluss der 3D-Ansicht der betroffenen Hautstellen sowie die haptische Komponente nicht außer Acht gelassen werden. Aktuelle teledermatologische Lösungen setzen fast ausschließlich auf die Nutzung von 2D-Bilddaten. Auch wenn diagnostische Fotos bereits einen gewissen Informationswert haben, können sie das Abtasten der Haut durch den*die Dermatolog*in sowie eine Begutachtung aus verschiedenen Winkeln und Entfernungen, wie sie ein Vor-Ort-Termin ermöglicht, nicht ersetzen. Eine Integration von visuellen und haptischen 3D-Daten könnte zu einer Verbesserung der Diagnosegenauigkeit und dem erhöhten Vertrauen der Dermatolog*innen in die eigene Ferndiagnose führen.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist die Erforschung eines geeigneten teledermatologischen Gesamtsystems zur Darstellung von 3D-Informationen, das die 3D-Aspekte der Vor-Ort-Diagnose berücksichtigt und in das System integriert. Abgrenzend zu bereits verfügbaren teledermatologischen Systemen soll die Diagnose nicht nur auf Basis von 2D-Bildern erstellt werden, sondern eine umfassendere Begutachtung ermöglichen, die auch die topologischen Merkmale der betroffenen Hautstellen berücksichtigt, sowie eine Abtastung der Hautstelle auch

aus der Ferne ermöglicht. Die Umsetzung erfolgt am Beispiel der kontinuierlichen Verlaufsdokumentation und -kontrolle der chronischen Hauterkrankung Psoriasis.

1.2 Wissenschaftliches Umfeld

Wesentliche Teile dieser Dissertation entstanden im Rahmen des Forschungsprojekts „HybridVITA - Medizinische Betreuung von Patient*innen mit chronischen Hauterkrankungen durch eine App-basierte Hybridlösung mit kontaktloser visotakter Diagnostik“, welches von April 2022 bis März 2025 durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR, ehemals BMBF) gefördert wurde¹. Das übergeordnete Ziel dieses Projekts war die Erforschung eines geeigneten teledermatologischen Gesamtsystems zur Unterstützung der Betreuung von Patient*innen mit chronischen Hauterkrankungen. In diesem Zusammenhang entstanden zwei verschiedene Prototypen für die viso-taktile Ferndiagnostik, ein VR-Handschuh sowie ein Ultraschall-Phased-Array. Im Verlauf des Projekts konnte die Expertise und das Feedback von Dermatolog*innen der Projektpartner Universitätsklinikum Mannheim (UMM) und Universitätsklinikum Würzburg (UKW) in Anspruch genommen werden, um die Eignung der Prototypen für die Ferndiagnose zu evaluieren, wobei sich das Ultraschall-Phased-Array als vielversprechender Ansatz erwies. Nach Ablauf der Projektlaufzeit wurde dieser Ansatz ohne direkte Projektunterstützung weiterentwickelt und um weitere Bausteine ergänzt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Dissertation gliedert sich in insgesamt zehn Kapitel. Nach dem hiermit abgeschlossenen **Kapitel 1** zur Einleitung folgen in **Kapitel 2** die Definitionen der benötigten medizinischen Fachbegriffe und Erläuterungen zu den

¹ <https://www.hybridvita.de/>

benötigten dermatologischen Grundlagen. In **Kapitel 3** werden die benötigten technologischen Fachbegriffe und Hintergründe behandelt, die für diese Dissertation wichtig sind. **Kapitel 4** untersucht die aktuell verfügbaren teledermatologischen Anwendungen auf ihre Potenziale und Grenzen und zeigt die Ergebnisse der Literaturrecherche zur Diagnosegenauigkeit in der Teledermatologie, um auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse die Ziele dieser Dissertation zu detaillieren. Darauf aufbauend wird in **Kapitel 5** eine Anforderungsanalyse durchgeführt, welche die Grundlage für das ebenfalls in diesem Kapitel erarbeitete Konzept bildet. Die Umsetzung des Konzepts wird in den Kapiteln 6 bis 8 aufgeteilt nach den Systembausteinen beschrieben. **Kapitel 6** befasst sich mit der Entwicklung der Systembausteine Patient*innen-App zur Datenaufnahme, Backend zur Datenverarbeitung, sowie dem Dermatolog*innen-Dashboard zur Datenvisualisierung. Das Vorgehen bei der Generierung von 3D-Modellen und der Entwicklung der visuellen Darstellung wird in **Kapitel 7** behandelt. In **Kapitel 8** wird schließlich die technische Realisierung der Hardware und Software für die haptische 3D-Darstellung vorgestellt. Abschließend werden alle entwickelten Teilsysteme in **Kapitel 9** auf ihre Nutzbarkeit, Eignung für die Ferndiagnose und Erfüllung der erhobenen Anforderungen evaluiert und die Ergebnisse diskutiert. In **Kapitel 10** erfolgt dann eine abschließende Zusammenfassung der erfolgten Forschungsarbeiten und ein Ausblick auf mögliche Anknüpfungspunkte.

2 Medizinische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die medizinischen Grundlagen vorgestellt, die für das Verständnis dieser Dissertation erforderlich sind. Zunächst werden die zentralen Aspekte der Hauterkrankung Psoriasis erläutert. Darauf aufbauend wird die haptische Wahrnehmung beschrieben, die für die Erfassung, Verarbeitung und Vermittlung haptischer Informationen bei dermatologischen Untersuchungen von Bedeutung ist. Abschließend werden Metriken zur Messung der Diagnosegenauigkeit sowie Werkzeuge zur Integration einer patient*innenzentrierten Bewertung der Krankheitslast in die Diagnose vorgestellt.

2.1 Psoriasis

Definition 2.1.1: Psoriasis

Psoriasis ist eine chronisch-entzündliche Hauterkrankung. Sie manifestiert sich typischerweise mit geröteten und schuppenden Hautstellen [9].

Mit einer Prävalenz von 2-3 % und damit rund 2 Millionen Betroffenen ist Psoriasis nach der atopischen Dermatitis die häufigste chronische Hauterkrankung in Deutschland. Die Krankheit hat eine bimodale Altersverteilung mit Gipfeln zwischen 20 und 30 Jahren (Frühtyp) sowie zwischen 50 und 60 Jahren (Spähtyp). [10]

Psoriasis entsteht durch eine fehlerhafte Autoimmunreaktion, bei der das Immunsystem vermehrt Zytokine freisetzt, die Entzündungsreaktionen auslösen. Die Zellen der obersten Hautschicht (Epidermis) teilen sich fast 10-mal so schnell

und wandern an die Hautoberfläche, wo sie nicht schnell genug abgestoßen werden können. Dadurch verdickt und schuppt die Haut. [11]

Die Ursachen für das Auftreten von Psoriasis sind nicht abschließend erforscht, es gilt allerdings als gesichert, dass eine Veranlagung zu Psoriasis erblich ist. Auslöser für das erste Auftreten und weitere Schübe sind verschiedene Triggerfaktoren, wie Stress, Infektionen, leichte Verletzungen und verschiedene Medikamente. [12]

Psoriasis tritt in verschiedenen Formen auf und manifestiert sich bei jedem*r Patient*in anders. Die häufigste Form der Psoriasis ist die *Psoriasis vulgaris* (Plaque-Psoriasis), bei der rot-entzündliche und erhabene Hautläsionen (*Plaques*) auftreten, die zumeist mit silbrigen oder weißen Schuppen bedeckt sind. Die Plaques können überall am Körper auftreten. Besonders häufig betroffen sind die Streckseiten der Unterschenkel und der Unterarme sowie die Handflächen, die Fußsohlen und die Kopfhaut. [9]

Psoriasis kann die Lebensqualität durch körperliche Beschwerden wie Juckreiz und Schmerzen, aber auch durch psychosoziale Auswirkungen, wie Angstzustände und Depressionen, stark einschränken. Häufig entstehen neben den Hautläsionen auch systematische Entzündungsreaktionen. [13]

2.1.1 Diagnose und Schweregrade

Nach einer ausführlichen Anamnese erfolgt eine Untersuchung der gesamten Haut. Die Diagnose wird auf Basis des klinischen Erscheinungsbildes getroffen. Wegweisend dafür sind verschiedene Hautphänomene. Das *Kerzenwachsphänomen* beschreibt das Aussehen und Verhalten der Schuppen, die an Kerzenwachs erinnern und beim Kratzen mit einem Spatel abspringen. Wird die äußere Schicht der Haut abgetragen, liegt eine letzte dünne Schicht frei (*Phänomen des letzten Häutchen*). Wird dieses mit einem Spatel abgekratzt, kommt es zu kleinen punktförmigen Blutungen, die als *Auspitzphänomen* bezeichnet werden. Eine weitere histologische Untersuchung ist nur selten notwendig. [14]

Der Schweregrad von Psoriasis wird auf Basis von drei Metriken bestimmt, die durch die Dermatolog*innen erhoben werden und nachfolgend beschrieben sind.

	Head	Arms
Area	☐ 0% ☐ <10% ☐ 10-29% ☐ 30-49% ☐ 50-69% ☐ 70-89% ☐ 90-100%	☐ 0% ☐ <10% ☐ 10-29% ☐ 30-49% ☐ 50-69% ☐ 70-89% ☐ 90-100%
Erythema (redness)	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4
Induration (thickness)	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4
Desquamation (scaling)	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4
		
	Trunk	Legs
Area	☐ 0% ☐ <10% ☐ 10-29% ☐ 30-49% ☐ 50-69% ☐ 70-89% ☐ 90-100%	☐ 0% ☐ <10% ☐ 10-29% ☐ 30-49% ☐ 50-69% ☐ 70-89% ☐ 90-100%
Erythema (redness)	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4
Induration (thickness)	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4
Desquamation (scaling)	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4	☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4
		

Abbildung 2.1: Online-PASI-Rechner für Dermatolog*innen [16]

Psoriasis Area and Severity Index (PASI)

Der PASI [15] ist der meistgenutzte Wert zur Bestimmung der Psoriasis-Schwere. Er beurteilt den Anteil der betroffenen Körperoberfläche und die Stärke der Plaques anhand ihrer Rötung, Dicke und Schuppung auf einer Skala von 0 bis 72. Der Körper wird in vier Bereiche aufgeteilt: Beine mit 40 % Hautanteil, Rumpf mit 30 % Hautanteil, Arme mit 20 % Hautanteil und Kopf mit 10 % Hautanteil. Für jeden Bereich wird ein individueller PASI-Score berechnet, der die Rötung, Dicke und Schuppung der Plaques bewertet. Aus den Teil-Scores wird dann ein Gesamt-Score berechnet, der die jeweiligen Anteile der Körperregionen berücksichtigt. Abbildung 2.1 zeigt einen Online-Rechner, der häufig von Dermatolog*innen zur Berechnung des PASI genutzt wird.

Body Surface Area (BSA):

Die Metrik BSA [17] bestimmt die von Psoriasis betroffene Körperoberfläche. Die Einteilung des Körpers erfolgt in verschiedene Regionen. Der Kopf und jeder Arm entsprechen hierbei einem Anteil von jeweils 9 % und der vordere und hintere Rumpf jeweils 18 %, genauso wie die Beine jeweils 18 % betragen. Die Körperregionen und ihr Anteil an der gesamten Körperoberfläche sind in Abbildung 2.2 zu sehen.

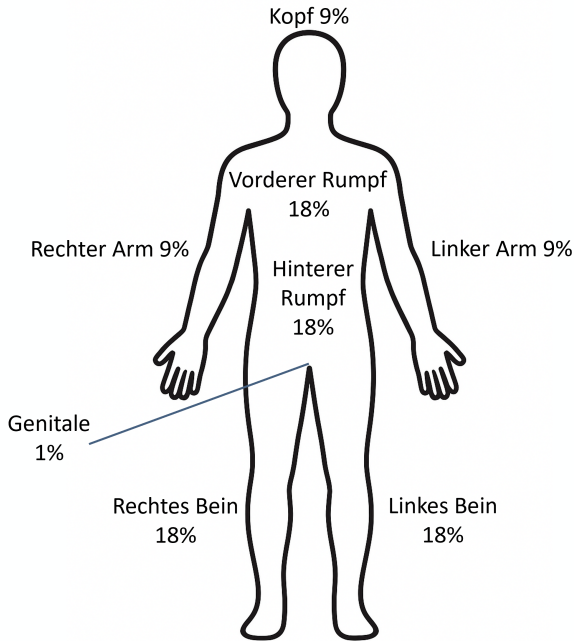


Abbildung 2.2: Anteil der Körperregionen an der Körperoberfläche

Dermatologischer Lebensqualitäts-Index (DLQI):

Chronische Hauterkrankungen haben oft weitreichende Auswirkungen auf das Leben der Betroffenen, die über dermatologische Symptome hinausgehen. Sie können zu Stigmatisierung, sozialen Problemen und emotionaler Belastung sowie Einschränkungen im Arbeits- und Freizeitbereich führen. Um diese subjektive und doch zentrale Dimension der Krankheitsbelastung zu erfassen, wurde der DLQI [18] entwickelt. Dieser misst die Einschränkung der Lebensqualität von Menschen mit Hauterkrankungen. Die Ermittlung erfolgt über einen standardisierten Fragebogen, den die Patient*innen ausfüllen. Der Fragebogen besteht aus zehn Fragen über die Lebensqualität der vergangenen sieben Tage, denen die

Patient*innen mit *überhaupt nicht*, *ein bisschen*, *ziemlich* und *sehr* zustimmen können [19]. Der vollständige Fragebogen ist in Anhang A.1.2 dargestellt. In der Auswertung erhalten die verschiedenen Abstufungen der Zustimmung Punkte zwischen 0 und 3. Die Punkte werden anschließend addiert. Am Ende steht ein Ergebnis zwischen 0 und 30 Punkten, wobei 0 für keine und 30 für eine sehr starke Beeinträchtigung der Lebensqualität durch Psoriasis steht. [20]

Schweregradeinstufung nach der S3-Leitlinie:

Der Schweregrad einer Psoriasis wird anhand der ermittelten Werte für PASI, BSA und DLQI bestimmt. Die Einteilung erfolgt auf Basis der aktuellen S3-Leitlinie [21] zur Therapie der Psoriasis vulgaris, welche die standardisierte Klassifikation in leichte bis besonders schwere Verlaufsformen vorgibt.

Eine leichte Psoriasis liegt vor, wenn BSA, PASI und DLQI kleiner oder gleich dem Wert 10 sind. Eine mittelschwere bis schwere Psoriasis liegt vor, wenn BSA oder PASI über dem Wert 10 liegen und der DLQI über 10 liegt. Eine besonders schwere Psoriasis liegt vor, wenn der PASI über 20 steigt und der DLQI gleichzeitig über 15 liegt. [21]

2.1.2 Therapie

Psoriasis ist nicht heilbar. Durch eine geeignete Therapie können Patient*innen jedoch symptomarm bis symptomfrei leben. Die Therapie von Psoriasis erfolgt abhängig vom diagnostizierten Schweregrad. Bei leichter Psoriasis ist meist eine *topische Therapie* ausreichend. Dabei kommen Cremes und Salben mit den Wirkstoffen Kortikosteroide, Salizylsäure, Dithranol und Vitamin D zum Einsatz, welche die übermäßige Hautzellteilung kontrollieren und Entzündungen hemmen. [21, 22]

Bei schwereren Formen von Psoriasis wird neben einer topischen Therapie auch eine *Phototherapie* mit UV-Licht eingesetzt, bei der die Haut mit UV-A- und UV-B-Licht bestrahlt wird. Die Bestrahlung verlangsamt die übermäßige Produktion von Hautzellen und bremst die Entzündungsreaktionen der Haut. [22, 23]

Neben der Phototherapie kann auch eine konventionelle *Systemtherapie* erfolgen,

bei der verschiedene Wirkstoffe wie Acitretin, Fumarate oder Methotrexat in Tablettenform verabreicht werden. Wenn durch eine konventionelle Systemtherapie kein ausreichender Therapieerfolg erreicht wird oder erwartbar ist, werden sogenannte *Biologika* eingesetzt. Diese werden per Infusion oder Injektion verabreicht. Die Biologika greifen in die immunologischen Fehlregulationen ein und hemmen bestimmte Botenstoffe, um die Entzündungsprozesse zu unterbrechen. [21, 23] Zusätzlich sollten auch die Begleiterkrankungen und psychischen Symptome behandelt werden.

Während der Akutphasen der Erkrankung finden engmaschige Kontrollen statt, um die Wirksamkeit und Nebenwirkungen der Therapie zu überwachen und gegebenenfalls die Therapie anzupassen. Wird das Therapieziel der Akutbehandlungsphase erreicht (z. B. signifikante Reduktion der Symptome), wird häufig zu einem Langzeitmanagement gewechselt, in dem eine geringere Frequenz der Behandlungen stattfindet und ein weiterer Fokus auf einer langfristigen Lebensstilintervention (z. B. Rauchentwöhnung, Gewichtsreduktion, Stressmanagement) liegt, um Triggerfaktoren von Schüben zu reduzieren. Es erfolgt weiterhin ein regelmäßiges Monitoring des Krankheitsverlaufs. [24]

2.2 Grundlagen der haptischen Wahrnehmung

Die haptische Wahrnehmung spielt in der Dermatologie eine zentrale Rolle. Die *Palpation* - das Abtasten des Körpers - erlaubt es Dermatolog*innen Informationen über die Steifigkeit, die Textur, die Temperatur und die Feuchtigkeit der Haut zu gewinnen, die durch eine rein visuelle Inspektion nicht zugänglich wären. [25] Der menschliche Tastsinn ist ein multisensorisches System, das in zwei Hauptfunktionen unterteilt wird. Die *Exterozeption* beschreibt die Wahrnehmung von Reizen aus der Außenwelt über die Haut. Die Wahrnehmung der eigenen Körperposition und -bewegung über Rezeptoren in den Muskeln, Gelenken und Sehnen wird als *Propriozeption* bezeichnet. [26]

Die Exterozeption erfolgt über das größte Sinnesorgan des Menschen, die Haut (*Cutis*). Anatomisch wird zwischen der behaarten Haut (*Felderhaut*) und der

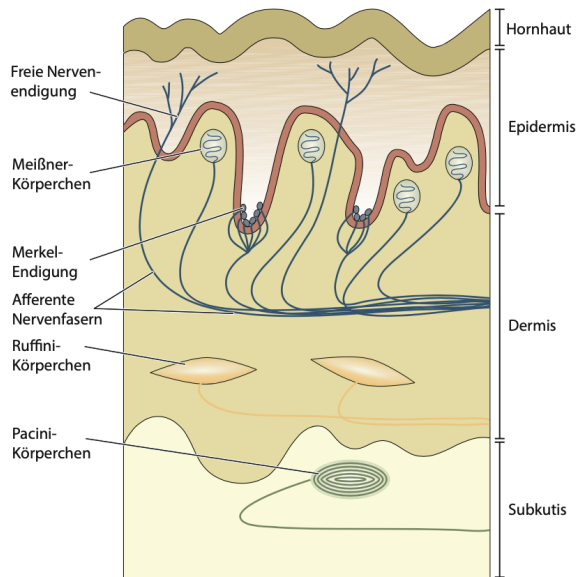


Abbildung 2.3: Anordnung der Mechanorezeptoren in der Haut, aus [28] S. 642

unbehaarten Haut (*Leistenhaut*) unterschieden [27]. Da für die haptische dermatologische Untersuchung primär die Handinnenflächen und Fingerspitzen relevant sind, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die Leistenhaut.

Die menschliche Haut besteht aus drei Hauptschichten (vgl. Abbildung 2.3). Die oberste Schicht, zu der auch die Hornhaut gehört, dient als äußere Schutzschicht und wird als *Epidermis* (Oberhaut) bezeichnet. Die nächste Schicht dient dem mechanischen Widerstand und wird als *Dermis* (Lederhaut) bezeichnet. Sie besitzt eine bindegewebige Struktur und enthält Blutgefäße, Nervenenden und Drüsen. Die unterste Schicht besteht aus Fett- und Bindegewebe und wird als *Subkutis* (Unterhaut) bezeichnet. [25]

2.2.1 Mechanorezeptoren

Definition 2.2.1: Mechanorezeptoren

Mechanorezeptoren sind Sinneszellen, die mechanische Reize wie Druck oder Vibration in elektrische Signale umwandeln, die das Nervensystem verarbeiten kann [25].

In der glatten Haut der menschlichen Hand gibt es vier verschiedene Arten von Mechanorezeptoren *Meissner-Körperchen*, *Ruffini-Körperchen*, *Pacini-Körperchen* und *Merkel-Zellen* [29]. Die Tabelle 2.1 fasst die Eigenschaften dieser vier Rezeptortypen zusammen. Die Mechanorezeptoren lassen sich anhand ihrer Lokalisation und Funktion unterscheiden. Merkel-Zellen und Meissner-Körperchen besitzen aufgrund ihrer oberflächennahen Lage an der Grenze zwischen Epidermis und Dermis kleine rezeptive Felder und ermöglichen eine hohe räumliche Auflösung. Pacini- und Ruffini-Körperchen liegen tiefer in der Dermis bzw. Subkutis, besitzen große rezeptive Felder und integrieren Reize über größere Hautareale. [26, 29] Die Abbildung 2.3 zeigt die Lage der verschiedenen Mechanorezeptoren in der Haut.

Die Mechanorezeptoren sind nicht in gleicher Anzahl über die gesamte Körperoberfläche verteilt. Ihre Dichte variiert stark und korreliert direkt mit dem räumlichen Auflösungsvermögen des Tastsinns. An den Fingerspitzen ist die Dichte der Merkel-Zellen und Meissner-Körperchen deutlich höher als beispielsweise am Handrücken oder dem Unterarm [27]. An den Fingerspitzen können so kleinste Details von bis zu ca. 1 mm sicher unterschieden werden [30].

Psoriasis-Plaques sind durch ihre Größe und Form sowie durch ihre Härte definiert. Medizinisch relevante Plaques haben meist Durchmesser von mehreren Millimetern bis Zentimetern [24]. Da der menschliche Tastsinn an den Fingerspitzen eine Auflösung von etwa 1 mm erreicht, ist der Mensch grundsätzlich in der Lage, die Konturen und die globale Form von kleinen, palpablen Plaques zu erfassen [30]. Die Kombination der Mechanorezeptoren ermöglicht es Dermatolog*innen, eine Läsion nicht nur in ihrer Größe zu erfassen, sondern sie qualitativ

Tabelle 2.1: Klassifikation der Mechanorezeptoren (nach [26, 29])

Name	Wahrnehmung	Vorkommen	Räumliche Auflösung	Frequenzbereich
Meissner-Körperchen	Berührung und niederfrequente Vibration	Dermis	3 mm	1-300 Hz
Ruffini-Körperchen	Dehnung	Dermis	> 7 mm	0,5 Hz
Pacini-Körperchen	Hochfrequente Vibration	Subkutis	> 10 mm	5 - 1000 Hz
Merkel-Zellen	Kanten und Punkte	Epidermis	0,5 mm	0-100 Hz

hinsichtlich ihrer Konsistenz und Oberflächenbeschaffenheit von gesundem Gewebe zu unterscheiden.

2.3 Kennwerte zur Bestimmung der Diagnosegenauigkeit

Im Kontext der Teledermatologie gewinnt der Vergleich zwischen In-Person-Diagnosen und teledermatologischer Diagnosen zunehmend an Bedeutung. Der folgende Abschnitt erläutert Kennwerte, mit denen die diagnostische Genauigkeit und Übereinstimmung zwischen verschiedenen Diagnoseformen bestimmt werden kann.

Definition 2.3.1: Interrater-Reliabilität

Die Interrater-Reliabilität misst die Übereinstimmung von verschiedenen Beurteilenden bei der Bewertung derselben Stichprobe [31].

In diagnostischen Studien beschreibt die Interrater-Reliabilität, in welchem Ausmaß verschiedene Ärzt*innen oder Systeme zu denselben Diagnosen gelangen, wenn sie identische Befunde beurteilen. Eine hohe Interrater-Reliabilität zeigt,

dass das Diagnoseverfahren unabhängig von der beurteilenden Person verlässliche Ergebnisse liefert. [32]

Definition 2.3.2: Cohens Kappa κ

Cohens Kappa κ bewertet die Übereinstimmung zwischen zwei Beurteilenden unter Berücksichtigung einer zufälligen Übereinstimmung [33].

Cohens Kappa κ ist ein statistisches Maß zur Quantifizierung der Interrater-Reliabilität. Es wird häufig verwendet, um die Übereinstimmung zwischen diagnostischen Einschätzungen zu bewerten, wenn mehrere medizinische Fachkräfte dasselbe Krankheitsbild bewerten. Im Gegensatz zur einfachen prozentualen Übereinstimmung korrigiert Kappa die beobachtete Übereinstimmung um die zufällig erwartete Übereinstimmung und liefert somit robuste Einschätzungen der tatsächlichen diagnostischen Übereinstimmung. Ein κ -Wert von 1 weist auf perfekte Übereinstimmung hin, während 0 eine Übereinstimmung auf Zufallsniveau bedeutet. [31]

Definition 2.3.3: Intrarater-Reliabilität

Die Intrarater-Reliabilität misst die Übereinstimmung von Beurteilenden mit sich selbst bei wiederholter Bewertung einer Stichprobe [31].

Die Intrarater-Reliabilität gibt die Stabilität der diagnostischen Einschätzungen einer Person über die Zeit hinweg an. Eine hohe Intrarater-Reliabilität zeigt, dass die diagnostizierende Person bei wiederholter Bewertung derselben Befunde zu derselben Diagnose gelangt. [32]

Definition 2.3.4: Sensitivität

Die Sensitivität gibt die Zuverlässigkeit eines medizinischen Diagnoseverfahrens an, erkrankte Personen als erkrankt zu erkennen [34].

Die Sensitivität beschreibt den Anteil der tatsächlich erkrankten Personen, die durch das Test- oder Diagnoseverfahren korrekt als krank identifiziert werden.

Eine hohe Sensitivität ist entscheidend, um Fehldiagnosen in Form von falsch-negativen Ergebnissen zu vermeiden und sicherzustellen, dass relevante Erkrankungsfälle erkannt werden. [35]

Definition 2.3.5: Spezifität

Die Spezifität gibt die Zuverlässigkeit eines medizinischen Diagnoseverfahrens an, gesunde Personen als gesund zu erkennen [34].

Die Spezifität gibt den Anteil der tatsächlich gesunden Personen an, die korrekt als nicht erkrankt erkannt werden. Eine hohe Spezifität reduziert die Rate falsch-positiver Diagnosen und trägt dazu bei, eine unnötige Behandlung oder psychische Belastung durch Fehlklassifikationen zu vermeiden. [35]

2.4 Erfassung subjektiver Krankheitsmetriken

Neben objektiven Kennwerten wie Diagnosegenauigkeit und Interrater-Reliabilität ist auch die Sicht der Patient*innen von zentraler Bedeutung. Diese wird durch selbstberichtete Informationen über Gesundheitszustand, Symptome und Lebensqualität erfasst, die als Patient-Reported Outcomes (PROs) bezeichnet werden. Während PROs die subjektiven Angaben der Patient*innen umfassen, bezeichnen Patient-Reported Outcome Measures (PROMs) die standardisierten Instrumente, mit denen diese Informationen systematisch und vergleichbar erhoben werden. [36]

Definition 2.4.1: Patient-Reported Outcome Measures (PROMs)

PROMs bezeichnen standardisierte Erhebungsinstrumente, mit deren Hilfe Patient*innen eigenständig Angaben zu ihrem Gesundheitszustand, ihrer Lebensqualität und ihren Einschränkungen im Alltag machen können – ohne Interpretation durch medizinisches Fachpersonal [37].

PROMs gewinnen sowohl in der klinischen Forschung als auch in der Routineversorgung zunehmend an Bedeutung. Sie stärken die Patient*innenzentrierung, indem sie individuelle Erfahrungen, Symptome und Lebenswirklichkeiten strukturiert erfassen und so in den Behandlungsprozess einbringen. Durch die Standardisierung werden diese subjektiven Angaben vergleichbar und messbar, wodurch sie klinische Kennwerte sinnvoll ergänzen. Gleichzeitig ermöglichen sie eine effizientere Nutzung personeller Ressourcen, da die Erhebung ohne direkte ärztliche Interpretation erfolgt [37]. Ein Beispiel für einen dermatologischen PROM ist der DLQI, der die krankheitsbedingte Lebensqualität von Patient*innen systematisch erfasst.

Gerade in der Teledermatologie spielt diese patient*innenzentrierte Perspektive eine entscheidende Rolle. PROMs erlauben hier die systematische Erfassung von Symptomen und Lebensqualität auch außerhalb von Präsenzterminen. [36]

3 Technische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die wesentlichen technischen Grundlagen vorgestellt, die für das Verständnis und die Umsetzung der in dieser Dissertation behandelten Konzepte erforderlich sind. Zunächst werden Methoden zur automatisierten Analyse visueller Daten erläutert, die für die 3D-Rekonstruktion, die Erkennung relevanter Objekte sowie die Bildsegmentierung und Kantendetektion von Bedeutung sind. Der Abschnitt Ultraschall führt in physikalische Prinzipien und technische Konzepte ein, die für die Erzeugung und Steuerung von Ultraschallwellen zur Erzeugung von haptischem Feedback relevant sind. Schließlich werden Werkzeuge der nutzendenzentrierten Entwicklung vorgestellt, die zu einer hohen Nutzbarkeit des zu entwickelnden Systems beitragen.

3.1 Computer Vision

Computer Vision ist ein Teilgebiet der künstlichen Intelligenz und Informatik, das Aufgaben automatisiert, die bisher dem menschlichen Sehen vorbehalten waren - etwa das Erkennen von Objekten oder das Bestimmen räumlicher Strukturen. Visuelle Daten werden nicht nur als Pixel angelegt, sondern semantisch und geometrisch interpretiert [38]. Im Folgenden werden verschiedene Bereiche der Computer Vision vorgestellt und dort eingesetzte Verfahren beschrieben, die in dieser Dissertation angewendet wurden.

3.1.1 Dreidimensionale Rekonstruktion

Die dreidimensionale Rekonstruktion von Objekten und Szenen auf Basis von zweidimensionalen Bilddaten ist eine zentrale Aufgabe der Computer Vision und findet neben der Medizin auch Anwendung in der Robotik, der Architekturerfassung und Visual Effects. Ziel ist es, aus mehreren Bildern von verschiedenen Blickwinkeln auf eine Szene eine konsistente 3D-Rekonstruktion zu erzeugen. [39] Nachfolgend werden grundlegende 3D-Rekonstruktionsverfahren vorgestellt, die sowohl eigenständig als auch in Kombination als Pipeline eingesetzt werden können, um eine vollständige 3D-Rekonstruktion aus 2D-Bilddaten zu realisieren. Abbildung 3.1 veranschaulicht, wie die nachfolgend vorgestellten Verfahren Structure-from-Motion (SfM), Multi-View Stereo (MVS), Poisson Surface Reconstruction (PSR), Neural Radiance Fields (NeRF) und Gaussian Splatting miteinander kombiniert werden können, um schrittweise von einzelnen Bildern zu einer vollständigen 3D-Darstellung zu gelangen. Jedes der Verfahren kann aber auch unabhängig eingesetzt werden, sofern die jeweils erforderlichen Eingangsdaten vorliegen.

3.1.1.1 Structure-from-Motion

SfM [40] ist ein Verfahren, das die Kameraparameter (Position und Orientierung) der 2D-Bilder schätzt und eine grobe Punktwolke der Szene erzeugt. In Gegensatz zu herkömmlichen Photogrammetrie-Verfahren werden bei SfM nur die Informationen aus den Bildern selbst zur Rekonstruktion verwendet. Als Voraussetzung werden eine Vielzahl von Bildern der Szene mit überlappenden Features als Eingangsdaten benötigt. Das Verfahren bildet den ersten Schritt vieler 3D-Rekonstruktions-Pipelines. [41]

Zunächst werden für jedes Eingabebild markante Features detektiert, die über mehrere Aufnahmen hinweg wiedererkennbar sind (*Feature Detection*). Abbildung 3.2 zeigt die Ergebnisse der Feature Detection beispielhaft für ein Frame einer Videodokumentation zum Krankheitsverlauf einer Psoriasis-Hautstelle am Handrücken. Die pinken Punkte stellen hierbei die erkannten Features dar. Im

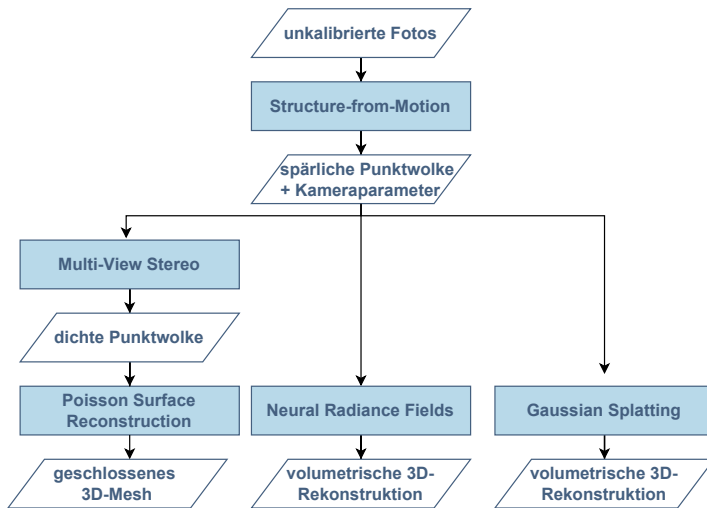


Abbildung 3.1: Darstellung der Beziehungen zwischen den vorgestellten 3D-Rekonstruktionsverfahren

nächsten Schritt werden die detektierten Features über alle Bildpaare hinweg verglichen, um übereinstimmende Features zu finden (*Feature Matching*). Abbildung 3.3 zeigt beispielhaft das Ergebnis des Feature Matching für zwei Eingabebilder. In Rot sind die detektierten Features zu sehen, während die erkannten Matches durch grüne Linien zwischen beiden Bildern verbunden sind. Die Matches bilden die Basis für die Schätzung der Epipolar-Geometrie, einem mathematischen Modell, das die geometrische Beziehung zwischen zwei Bildern aus unterschiedlichen Blickwinkeln der gleichen Szene beschreibt. Im nächsten Schritt erfolgt die geometrische Verifikation der gefundenen Matches (*Geometrical Verification*). Um falsche Übereinstimmungen zu filtern, wird das Schätzverfahren *Random Sample Consensus (RANSAC)* [42] verwendet, das aus den Übereinstimmungen iterativ Modelle erstellt und die Matches entfernt, die zu stark abweichenden Modellen führen. Es entsteht ein Szenengraph mit den Bildern als Knoten und den verifizierten Bildpaaren als Kanten.

Danach erfolgt die inkrementelle Rekonstruktion (*Incremental Reconstruction*). Das Modell wird mit einem gewählten Bildpaar initialisiert, das als Basisstruktur



Abbildung 3.2: Ergebnisse der Feature Detection des SfM-Verfahrens

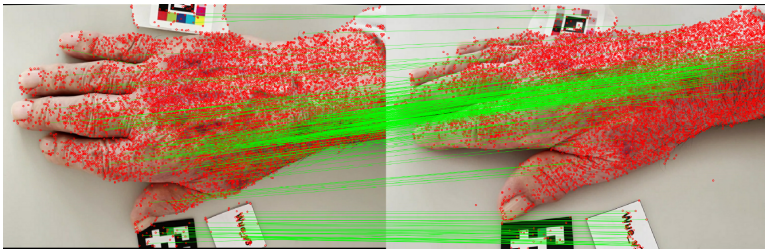


Abbildung 3.3: Ergebnisse des Feature Matching des SfM-Verfahrens

für die Szene fungiert. Dabei sollte ein Bildpaar aus dem Szenengraph gewählt werden, dass möglichst viele Überlappungen hat, damit die Rekonstruktion robust und genau ist. Mittels *Triangulation* werden aus den Bildpunktpaaren und den entsprechenden Kameraparametern die 3D-Koordinaten der zugehörigen Szenenpunkte berechnet.

Die 3D-Struktur wird iterativ weiter aufgebaut und weitere Bilder integriert. Die neuen 3D-Punkte werden mit der Perspective-n-Point-Methode [43] geschätzt, die 2D-3D-Punktkorrespondenzen nutzt, um die Merkmale im neuen Bild mit den bereits triangulierten 3D-Punkten zu verknüpfen (*Image Registration*). Um mögliche Ausreißer in der Punktkorrespondenz zu filtern, wird erneut RANSAC genutzt. Wurde ein neues Bild erfolgreich registriert, können die neuen 3D-Punkte hinzugefügt werden.

Im letzten Schritt erfolgt eine gemeinsame, nichtlineare Optimierung der Kameraparameter und 3D-Punkte, um Reprojektionsfehler, die durch die Kopplung der Kameraparameter und 3D-Punkte entstehen können, zu minimieren (*Bundle Adjustment*). [40]

3.1.1.2 Multi-View Stereo

MVS [44] dient zur dichten Rekonstruktion einer Szene aus mehreren überlappenden Bildern. Ziel ist die Schätzung einer hochaufgelösten Punktwolke, die auch feinere Oberflächendetails erfasst und so als Grundlage für nachfolgende Oberflächenrekonstruktionen dient. Während SfM primär die Kameraparameter und eine spärliche Punktwolke erzeugt, nutzt MVS genau diese Daten, um für jeden Bildpunkt dichte 3D-Informationen zu schätzen und bildet damit typischerweise den zweiten Schritt in vielen 3D-Rekonstruktions-Pipelines.

Voraussetzung für die Anwendung von MVS ist ein bereits registrierter Bildsatz mit bekannten Kameraparametern. Das Verfahren basiert auf der Annahme, dass Oberflächenpunkte, die in mehreren Bildern sichtbar sind, anhand der Pixelintensitäten wiedererkannt werden können und dadurch präzise 3D-Koordinaten erhalten (*Dense Matching*). [45]

Für jedes Bild werden zu Beginn Tiefenkarten (*Depth Maps*) berechnet. Diese geben für jedes Pixel die Entfernung zur Kamera an. Helle Bereiche entsprechen geringen Tiefenwerten und dunkle Bereiche größeren Entfernungen [44]. Abbildung 3.4 zeigt beispielhaft eine berechnete Tiefenkarte einer Kameraperspektive. Anschließend werden die Tiefenkarten miteinander fusioniert (*Depth Map Fusion*). Widersprüchliche Messungen werden dabei entfernt und nur die stabilen Punkte beibehalten, so entsteht eine dichte Punktwolke mit geometrischen Strukturen der Szene. [45]

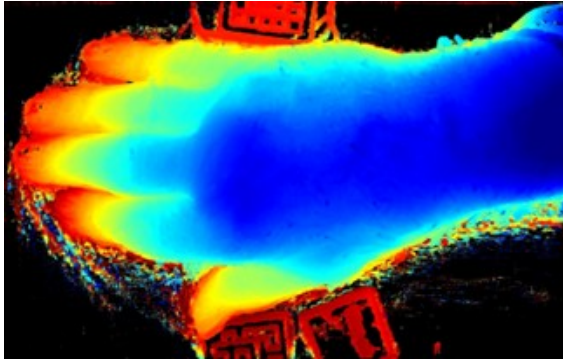


Abbildung 3.4: Ergebnis der Tiefenkarten-Berechnung im MVS-Verfahren

3.1.1.3 Poisson Surface Reconstruction

PSR [46] berechnet aus der dichten Punktwolke, die durch MVS erzeugt wurde, eine zusammenhängende und geschlossene 3D-Oberfläche. Der Algorithmus basiert auf der Lösung der Poisson-Gleichung aus der Potenzialtheorie und nutzt die Normalenvektoren der durch die Punktwolke angenäherten Oberfläche, um eine kontinuierliche Oberflächenstruktur zu rekonstruieren.

Die Idee von PSR besteht darin, die rekonstruierte Oberfläche als Isofläche einer impliziten Funktion darzustellen. Dazu wird die *Indikatorfunktion* $\chi_M(\mathbf{q})$ definiert, die für Punkte q innerhalb des Modells M den Wert 1 und außerhalb des Modells den Wert 0 annimmt. [46]

$$\chi_M(\mathbf{q}) = \begin{cases} 1, & \text{falls } \mathbf{q} \in M, \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.1)$$

Der Gradient $\nabla \chi_M$ zeigt an den Grenzflächen ∂M in Richtung der Oberfläche und nimmt ansonsten den Wert 0 an.

$$\min_{\chi} \int_{\Omega} \|\nabla \chi(\mathbf{q}) - \mathbf{V}(\mathbf{q})\|^2 d\mathbf{q}, \quad (3.2)$$

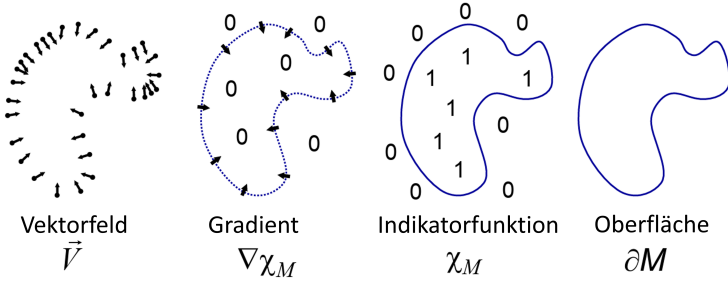


Abbildung 3.5: Rekonstruktionsprozess des PSR-Verfahrens [48]

$\mathbf{V}(\mathbf{q})$ ist dabei das Vektorfeld, das die Normalen approximiert. Durch Anwendung des Divergenzoperators ergibt sich die *Poisson-Gleichung*:

$$\Delta \chi(\mathbf{q}) = \nabla \cdot \mathbf{V}(\mathbf{q}), \quad (3.3)$$

mit $\Delta = \nabla \cdot \nabla$ als Laplace-Operator. Die Lösung dieser Gleichung liefert eine glatte Funktion, deren Isofläche die rekonstruierten Oberflächenpunkte beschreibt. [46]

Als Lösung des Systems wird die Oberfläche als *Isofläche* der Funktion χ extrahiert. Ein typischer Wahlwert γ ist der Mittelwert von χ an den Punktwolken-Daten:

$$\widetilde{\partial M} = \{\mathbf{q} \mid \chi(\mathbf{q}) = \gamma\}. \quad (3.4)$$

Abbildung 3.5 veranschaulicht die Teilschritte des PSR-Verfahrens. Zur Extraktion der Isofläche können Verfahren wie *Marching Cubes* [47] verwendet werden, welche die implizit definierte Oberfläche in ein Dreiecksnetz überführen. [48]

3.1.1.4 Neural Radiance Fields (NeRF)

NeRF [49] modelliert die Licht-, Farb- und Transparenzverteilungen einer Szene durch ein tiefes neuronales Netz. Als Eingangsdaten nutzt es 2D-Bilder und die Kameraparameter, die beispielsweise mit SfM generiert werden können. Das Netz lernt die kontinuierliche Repräsentation des gesamten Sichtfelds, anstatt eine explizite Oberfläche zu berechnen. Das Grundprinzip von NeRF besteht darin, jeden Punkt im dreidimensionalen Raum durch seine Position und die Blickrichtung der Kamera zu beschreiben. Das neuronale Netz berechnet für jeden Punkt die Lichtintensität und die Lichtdurchlässigkeit. Diese Informationen werden dann über Strahlen entlang der Sichtlinie der Kamera zu einem Bild zusammengefügt (*Volumenrendering*). [49]

NeRF modelliert die dreidimensionale Szene durch eine Funktion

$$F_{\theta}(\mathbf{x}, \mathbf{d}) \longrightarrow (\mathbf{c}, \sigma),$$

die jedem Punkt im Raum $\mathbf{x} = (x, y, z)$ und jeder Blickrichtung $\mathbf{d} = (d_x, d_y, d_z)$ eine Lichtintensität $\mathbf{c} = (r, g, b)$ sowie eine Lichtdurchlässigkeit σ zuordnet. Die Funktion F_{θ} wird durch ein neuronales Netzwerk approximiert. Während des Trainings lernt das Netzwerk, die räumliche Struktur der Szene und die Lichtverteilung konsistent zu repräsentieren. Beim Volumenrendering werden entlang eines von der Kamera in die Szene verlaufenden Strahls viele Punkte abgetastet, um die Gesamthelligkeit jedes Pixels zu bestimmen. Auf diese Weise ermöglicht NeRF, aus einer begrenzten Anzahl von Bildern realistische neue Ansichten der Szene zu erzeugen. Der Ansatz erfasst so auch feine Details wie Schatten, Reflexionen und komplexe Lichtstreuung. [49]

3.1.1.5 Gaussian Splatting

Gaussian Splatting ist ein Verfahren zur 3D-Rekonstruktion, das eine explizite Repräsentation der Szene als Menge von anisotropen 3D-Gaussians erstellt.

Es wurde als Alternative zu NeRF entwickelt, um eine höhere Renderinggeschwindigkeit bei gleicher Qualität zu erreichen. Gaussian Splatting nutzt zur Rekonstruktion die geschätzten Kameraparameter und spärliche Punktwolke des SfM-Verfahrens [50].

Zunächst wird jeder Punkt der Punktwolke in einen 3D-Gaussian überführt. Ein 3D-Gaussian ist ein im Raum platzierter Gaußellipsoid, der Farbe, Transparenz und Form kontinuierlich beschreibt.

Das Rendering erfolgt durch die Projektion der 3D-Gaussians auf das 2D-Bild der gewählten Kameraposition. Die Gaussians werden dabei nach ihrer Entfernung zur Kamera sortiert, um eine korrekte Tiefendarstellung zu erzeugen. So entsteht für die Szene ein kontinuierliches volumetrisches Modell aus den Gaussians. Um den Rekonstruktionsfehler zu minimieren, werden die Parameter aller Gaussians gradientenbasiert optimiert. [51]

3.1.1.6 Bewertung der Rekonstruktions-Genauigkeit

Für die quantitative Messung der Qualität einer 3D-Rekonstruktion werden häufig Bildvergleichsmetriken genutzt, die eine gerenderte Ansicht der Rekonstruktion mit einem Referenzbild der Szene vergleichen. In dieser Dissertation wurden dazu die folgenden Vergleichsmetriken genutzt.

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR):

PSNR ist ein pixelbasiertes Maß zur Beurteilung der Rekonstruktionsgenauigkeit und basiert auf dem mittleren quadratischen Fehler (engl. *mean squared error*, MSE) zwischen einem Referenzbild I_{ref} und einem rekonstruierten Bild I_{recon} . [52]

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{\text{recon},i} - I_{\text{ref},i})^2 \quad (3.5)$$

Bei der Bewertung der 3D-Rekonstruktionen wird PSNR eingesetzt, um die Abweichung der Licht- und Farbwerte zwischen Referenzbild und 3D-Modell zu analysieren.

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}} \right), \quad (3.6)$$

wobei MAX der maximal mögliche Pixelwert ist (z. B. 255 bei 8-Bit-Bildern). Ein Wert im Bereich zwischen 30 und 50 dB gilt als hohe Übereinstimmung. [52]

Structural Similarity (SSIM):

SSIM [53] berücksichtigt bei der Bewertung der Bildähnlichkeit neben der Helligkeit auch die Kontrast- und Strukturinformationen. Die Bewertung orientiert sich damit an der menschlichen Wahrnehmung. Der Vergleich zwischen zwei Bildern x und y ergibt sich zu

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}, \quad (3.7)$$

wobei μ_x und μ_y die lokalen Mittelwerte, σ_x^2 und σ_y^2 die Varianzen und σ_{xy} die Kovarianz der beiden Bildpatches darstellen. Der Wertebereich liegt zwischen 0 und 1, wobei 1 einer maximalen Übereinstimmung entspricht. [53]

Learned Perceptual Image Patch Similarity (L-PIPS):

L-PIPS [54] misst die Ähnlichkeit zwischen zwei Bildern anhand von Merkmalen, die aus einem vortrainierten tiefen neuronalen Netz extrahiert werden. Im Gegensatz zu pixelbasierten Metriken bewertet L-PIPS Unterschiede in einem hochdimensionalen Merkmalsraum, wodurch strukturelle und semantische Aspekte der Bildinhalte berücksichtigt werden. Der Vergleich zweier Bilder x und y erfolgt dabei durch die Berechnung der Distanz d_{LPIPS} zwischen ihren Feature-Repräsentationen in den Zwischenschichten des vortrainierten Netzes.

$$d_{\text{LPIPS}}(x, y) = \sum_l \frac{1}{H_l W_l} \sum_{h=1}^{H_l} \sum_{w=1}^{W_l} \|w_l \cdot (f_l(x)_{h,w} - f_l(y)_{h,w})\|_2^2, \quad (3.8)$$

wobei f_l die Feature-Map der l -ten Schicht eines neuronalen Netzes und w_l die gelernten Gewichtungen beschreibt. Der Term $\frac{1}{H_l W_l}$ ist der Normalisierungsfaktor für die Schicht l . Er sorgt dafür, dass die Summe der quadrierten Differenzen über alle Pixel (h, w) der Feature Map durch die Gesamtanzahl der Pixel in dieser Feature Map geteilt wird. Dies stellt sicher, dass Schichten mit größeren Feature Maps keinen übermäßigen Einfluss auf das Endergebnis haben, nur weil sie mehr Pixel enthalten. Die Normierung garantiert, dass jede Schicht l einen proportionalen Beitrag leistet, unabhängig von ihrer räumlichen Größe. Der Wertebereich liegt zwischen 0 und 1, wobei hier ein Wert nahe 0 einer hohen Übereinstimmung entspricht. [54]

L-PIPS korreliert besser mit der menschlichen Wahrnehmung von Bildähnlichkeit als PSNR oder SSIM und wird daher häufig in modernen Verfahren zur Bewertung von 3D-Rekonstruktionen und Neural Rendering eingesetzt [54].

3.1.2 Saliente Objekterkennung

Saliente Objekterkennung (engl. *Salient Object Detection*, SOD) ist ein Teilgebiet der Computer Vision, mit dem Ziel, die auffälligsten und für den Menschen prägnantesten Bereiche in Bildern zu identifizieren. Es approximiert die menschlichen Aufmerksamkeitsmechanismen und berücksichtigt neben niedrigstufigen Merkmalen wie Farbe, Helligkeit und Kanten auch Kontextinformationen, um hervorstechende Bereiche zu identifizieren. Als Ergebnis entsteht eine binäre Maske, die den Vordergrund und den Hintergrund des Bildes trennt. [55]

SOD-Modelle basieren auf neuronalen Netzen, die hierarchische Merkmale aus Bildern extrahieren und daraus eine Salienzkarte rekonstruieren, die angibt, wo sich hervorstechende Merkmale im Bild befinden. Einige Modelle, wie das *Inverse Saliency Pyramid Reconstruction Network (InSPyReNet)* [56] nutzen zusätzlich

pyramidale Strukturen. Diese ermöglichen es, gleichzeitig grobe Strukturen und feine Details der Bilder zu erfassen, in dem das Eingabebild in mehreren Auflösungen dargestellt wird. Die oberen Ebenen zeigen kleine, grobe Versionen des Bildes zur Fokussierung auf globale Strukturen, während die unteren Ebenen hochauflösende Versionen nutzen, um feine Details und Kanten zu detektieren. Die Merkmale der Ebenen werden zu einer Salienzkarte zusammengeführt, die sowohl globale als auch lokale Kontexte berücksichtigt. [56]

3.1.3 Schwellwertsegmentierung

Schwellwertsegmentierung ist eine weit verbreitete Methode der Bildsegmentierung, bei der ein Bild basierend auf den Pixelwerten in Vordergrund und Hintergrund unterteilt wird. Dabei wird ein Schwellwert T definiert, der bestimmt, ob ein Pixel an der Position (x, y) , basierend auf seinem Grauwert $g(x, y)$, als Vordergrund oder Hintergrund klassifiziert wird. Als Ergebnis entsteht eine binäre Maske $B(x, y)$, bei der Vordergrund-Objekten eine 1 und dem Hintergrund eine 0 zugewiesen wird. [57]

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } g(x, y) > T \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.9)$$

Der Schwellwert T kann dabei entweder manuell gesetzt oder mit Algorithmen, wie beispielsweise dem *Otsu-Algorithmus* [58], basierend auf der Histogrammverteilung der Pixel bestimmt werden.

Farbige Bilder im RGB-Farbraum können für den gleichen Farbton unterschiedliche Intensitätswerte haben, weshalb eine Transformation des Bildes in den *LAB-Farbraum* die Schwellwertsegmentierung verbessern kann. Der LAB-Farbraum beschreibt die Farbe als die drei Zahlenwerte L (Helligkeit), a (Grün-Rot-Komponente) und b (Blau-Gelb-Komponente). Durch die Farbraumtransformation ist die Helligkeit von der Farbe getrennt und Bilder können besser segmentiert werden, selbst wenn Farben im Bild ähnlich sind. [59]

3.1.4 Kantendetektion

Kantendetektion ist eine grundlegende Methode der Computer Vision, die Stellen im Bild detektiert, an denen sich die Intensität stark ändert, um so Objektränder zu erkennen. Die Kantendetektion $G(x, y)$ eines Bildes $I(x, y)$ wird meist über den Gradienten berechnet. [60]

$$G(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2} \quad (3.10)$$

Bei der klassischen Kantenerkennung kann ein binärer Kantenwert $B(x, y)$ durch einen Schwellwert T auf dem Gradienten definiert werden.

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } G(x, y) > T \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.11)$$

Holistically-Nested Edge Detection (HED) [61] ist ein neuronales Netz, um präzise Kanten auf mehreren Skalen zu detektieren. Das Netz betrachtet das Bild auf verschiedenen Skalen, um gleichzeitig große Objekte und feine Details zu erfassen (holistic) und erzeugt eine Kantenkarte $E_i(x, y)$ auf mehreren Ebenen i der Feature-Hierarchie (nested), die mit w_i gewichtet zu einer finalen Kantenkarte $E(x, y)$ kombiniert werden. Die Sigmoid-Funktion transformiert den gewichteten Summenwert in einen Bereich zwischen 0 und 1, damit die Ausgabe als Kantenvahrscheinlichkeit interpretiert werden kann. [61]

$$E(x, y) = \sigma\left(\sum_i w_i E_i(x, y)\right) \quad (3.12)$$

3.2 Ultraschall

Definition 3.2.1: Ultraschall

Der Begriff Ultraschall umfasst Schallwellen oberhalb der menschlichen Hörschwelle, beginnend ab 20 kHz [62].

Die mechanischen Druckwellen von Ultraschall breiten sich in einem Medium durch Kompression und Rarefizierung aus, was zu einer longitudinalen Welle führt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der longitudinalen Welle hängt von der Dichte ρ des Mediums und dem Elastizitäts- bzw. Kompressionsmodul K des Mediums ab. Je dichter ein Medium ist, desto schneller breitet sich die Schallwelle aus. [62]

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3.13)$$

Die akustische Impedanz Z eines Mediums berechnet sich aus der Dichte des Mediums ρ und der Schallgeschwindigkeit im Medium c zu

$$Z = \rho c. \quad (3.14)$$

Neben der longitudinalen Wellen entstehen je nach Medium auch transversale Scherwellen, bei denen Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Je geringer die mechanische Steifigkeit des Mediums ist, desto stärker werden diese Scherwellen gedämpft, weshalb in vielen Anwendungen nur die longitudinale Welle betrachtet wird. [63]

3.2.1 Akustischer Strahlendruck

Ein zentrales physikalisches Phänomen im Bereich der kontaktlosen Haptik-Erzeugung ist der akustische Strahlendruck. Trifft eine Schallwelle in Luft auf eine Materie, verzerrt sich die Wellenform durch den Aufprall. Hierdurch entsteht ein statischer Druck auf der Oberfläche des Objekts. Dieser Druck wird als akustischer Strahlendruck bezeichnet. [64]

$$P = \alpha E = \alpha \frac{p^2}{\rho c^2}, \quad (3.15)$$

wobei P der mittlere Strahlungsdruck, p der effektive Strahlendruck, ρ die Dichte des Mediums, c die Schallgeschwindigkeit im Medium und E die akustische Energiedichte ist [65]. Der einheitenlose Koeffizient α gibt an, welcher Anteil des Schalls reflektiert wird. α berechnet sich aus

$$\alpha = 1 + R^2, \quad (3.16)$$

wobei R der Intensitäts-Reflexionskoeffizient ist. Bei $\alpha = 2$ wird der gesamte Schall reflektiert, während er bei $\alpha = 1$ vollständig absorbiert wird. [64]

Um die Reflexion des Ultraschalls an der Hautoberfläche zu bestimmen, wird R zwischen den Medien Luft und Haut bestimmt. Dieser gibt den Leistungsanteil an, der in das zweite Medium, hier die Haut, gelangt.

$$R = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right|^2 \quad (3.17)$$

Z_1 ist die akustische Impedanz des einfallenden Mediums (Luft) und Z_2 die akustische Impedanz des zweiten Mediums (Hautgewebe). [66]

Aus [67] ergeben sich die charakteristische akustische Impedanz des Hautgewebes $Z_{\text{Haut}} = 1,63 \cdot 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ und Luft $Z_{\text{Luft}} = 0,0004 \cdot 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$.

Hieraus lässt sich der Reflexionskoeffizient bestimmen:

$$R = \left| \frac{Z_{\text{Haut}} - Z_{\text{Luft}}}{Z_{\text{Haut}} + Z_{\text{Luft}}} \right|^2 \approx 0,999 = 99,9\% \quad (3.18)$$

Es werden demnach 99,9 % des Ultraschalls an der Hautoberfläche reflektiert. Hierdurch ergibt sich ein approximierter Koeffizient $\alpha = 2$, was einen maximierten Strahlungsdruck bedeutet. [66]

3.2.2 Erzeugung von Ultraschall mit Ultraschallwandlern

Ultraschallwandler erzeugen Ultraschall, indem sie elektrische Energie in mechanische Schwingungen umwandeln. Die vorherrschende Technologie in Ultraschallwandlern basiert auf dem *inversen piezoelektrischen Effekt*. Piezoelektrizität ist eine Eigenschaft bestimmter kristalliner Materialien (z. B. Quarz), die mechanische Verformung als Reaktion auf ein elektrisches Feld erzeugen. Ein an den Wandler angelegtes elektrisches Feld E erzeugt eine mechanische Deformation S des piezoelektrischen Materials im Wandler. Umgekehrt führt eine von außen aufgebrachte mechanische Spannung T zu einer elektrischen Verschiebung D im Inneren des Materials, was dem *direkten piezoelektrischen Effekt* entspricht. [68, 69]

Der Effekt wird durch die Proportionalitätskonstante d beschrieben und ist für den direkten und den inversen Fall gleich. [69]

$$d = \frac{S}{E} = \frac{D}{T} \quad (3.19)$$

Die zeitlich periodische Deformation der Wandleroberfläche erzeugt eine periodische Druckänderung im Medium [69]. Abbildung 3.6 zeigt den schematischen Aufbau eines Ultraschallwandlers.

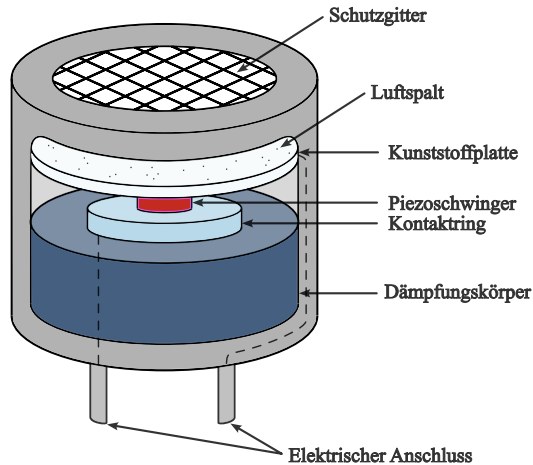


Abbildung 3.6: Schematischer Aufbau eines Ultraschallwandlers

3.2.3 Ultraschall-Phased-Array

Definition 3.2.2: Ultraschall-Phased-Array (UPA)

Als UPA wird eine geometrisch definierte Anordnung mehrerer Ultraschallwandler bezeichnet, die durch eine phasenversetzte Ansteuerung eine gezielte Lenkung des Schallfeldes ermöglicht. [70]

Die Bezeichnung *Array* verweist auf die systematische Anordnung der Einzelelemente, während der Begriff *Phased* die kontrollierte Steuerung der Phasenlage der von den Wandlern ausgesandten Schallwellen beschreibt. Durch eine gezielte Phasenverschiebung der Signale lässt sich das Schallfeld so modulieren, dass sich die Wellen in gewählten Punkten konstruktiv überlagern. Dieses Prinzip beruht auf der Schallabstrahlung und des damit verbundenen Druckfeldes. Im Kontext des haptischen Feedbacks ermöglichen UPAs die Erzeugung fühlbarer Druckpunkte an der Hautoberfläche, in dem der erzeugte akustische Strahlungsdruck lokal gebündelt und moduliert wird. [71]

3.2.3.1 Allgemeiner Aufbau

Ein UPA besteht typischerweise aus $M \times N$ Ultraschallwandlern, die in einer Ebene angeordnet sind. Die genaue Anzahl und Anordnung hängt dabei vom jeweiligen Einsatzzweck ab.

Durch den Effekt des akustischen Strahlendrucks entsteht ein Druck, wenn die Ultraschallwellen auf die Hautoberfläche treffen. Der akustische Strahlendruck eines einzelnen Ultraschallwandlers hat dabei typischerweise keine fühlbare Wirkung. Werden die Ultraschallwellen mehrerer Ultraschallwandler zeitlich so gesteuert, dass sie sich in einem Punkt überlagern, entsteht ein spürbarer Druckpunkt, der als *Fokuspunkt* bezeichnet wird. Abbildung 3.7 veranschaulicht die Entstehung eines Fokuspunktes. [72]

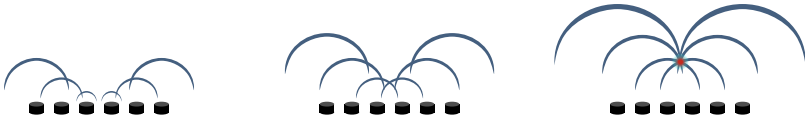


Abbildung 3.7: Veranschaulichung der Fokuspunktentstehung mit Ultraschall, basierend auf [72].

Um Fokuspunkte zu erzeugen, muss die benötigte Phasenverschiebung der einzelnen Wandler berechnet werden. Abbildung 3.8 zeigt die Anordnung eines quadratischen UPA und dem gewünschten Fokuspunkt zueinander. Das UPA liegt dabei in der Ebene $z = 0$. Die Koordinaten der einzelnen Wandler sind $Q_{mn}(x_m, y_n, 0)$ und die Koordinaten eines Fokuspunkts lauten $P(x_F, y_F, z_F)$, wobei $z_F > 0$. Der Abstand zwischen den einzelnen Wandlern ist als d definiert. [73]

Die Laufzeit t_{mn} der Ultraschallwelle zum Fokuspunkt berechnet sich als

$$t_{mn} = \frac{\sqrt{(x_m - x_F)^2 + (y_n - y_F)^2 + z_F^2}}{c}, \quad (3.20)$$

wobei c die Schallgeschwindigkeit ist. Aus der Ankunftszeit der Ultraschallwelle der einzelnen Wandler t_{mn} und der maximalen Ankunftszeit aller Wandler

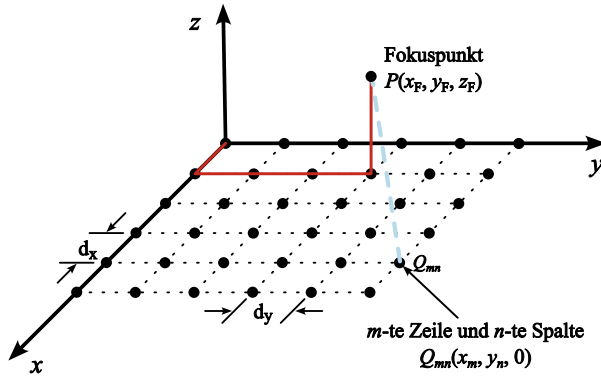


Abbildung 3.8: Ultraschall-Phased-Array und Fokuspunkt, basierend auf [73].

$t_{\max} = \max_{m,n}(t_{mn})$ bestimmt sich die Verzögerung der Ansteuerung der einzelnen Wandler τ_{mn} , damit alle Wellen zum gleichen Zeitpunkt im Fokuspunkt zusammentreffen. [74]

$$\tau_{mn} = t_{\max} - t_{mn} \quad (3.21)$$

Die Taktverzögerung δ_{mn} wird entsprechend des Verzögerungstaktes $f_{\text{Verzögerung}}$ berechnet. Sie gibt die Anzahl an Takten an, die abgewartet werden muss, bevor der jeweilige Wandler ein Steuersignal zum Aussenden seiner Ultraschallwelle erhält. [73]

$$\delta_{mn} = \lceil \tau_{mn} \cdot f_{\text{Verzögerung}} \rceil \quad (3.22)$$

Die Verzögerung kann mittels eines Zählers oder eines Schieberegisters realisiert werden. [65]

3.2.4 Modulationsarten

Um Nutzenden einen bewussten haptischen Eindruck zu vermitteln, muss der Schalldruck am Fokuspunkt so gesteuert werden, dass die haptische Wahrnehmung der menschlichen Haut gezielt stimuliert wird. Die menschlichen Mechanorezeptoren reagieren nicht auf statische Kräfte, weshalb die Fokuspunktposition und -intensität zeitlich moduliert werden müssen. Die genutzte Modulationsfrequenz f_M liegt dabei typischerweise im Wirkungsbereich der Mechanorezeptoren, damit die erzeugte Schwingung als Kontur eines virtuellen Objekts wahrgenommen werden kann. Um Bewegungen oder Verschiebungen der haptischen Modulation zu modulieren, muss die Zweipunktschwelle berücksichtigt werden. Diese gibt den minimalen Abstand an, bei dem zwei Punkte noch als zwei separate Reize wahrgenommen werden. An den Fingerspitzen, wo die Rezeptordichte am höchsten ist und die rezeptiven Felder am kleinsten sind, liegt die Zweipunktschwelle in der Regel bei nur etwa 1–2 mm. [30]

Um eine laterale Verschiebung bei der Modulation nicht erkennbar zu machen, sollte die Bewegung oder die Verschiebung des Stimulationpunktes idealerweise deutlich unterhalb dieser Schwelle liegen, d.h., sie sollte weniger als 0,5 mm betragen, um die Wahrscheinlichkeit einer Detektion zu minimieren. Ein Stimulus, der sich um 1 mm verschiebt, könnte an der Fingerspitze bereits als Bewegung oder als zwei unterschiedliche Punkte wahrgenommen werden. Dieses Limit wird durch die Dichte der Merkel-Zellen, die für die feine räumliche Auflösung zuständig sind, bestimmt [29]. Es gibt drei wichtige Modulationsarten in der Ultraschall-Haptik, die in Abbildung 3.9 am Beispiel der haptischen Darstellung eines Kreises dargestellt sind.

3.2.4.1 Amplitudenmodulation

Dabei wird das hochfrequente Ansteuersignal der Ultraschallwandler mit einer niederfrequenten Modulation überlagert. Eine typische Modulationsfrequenz ist

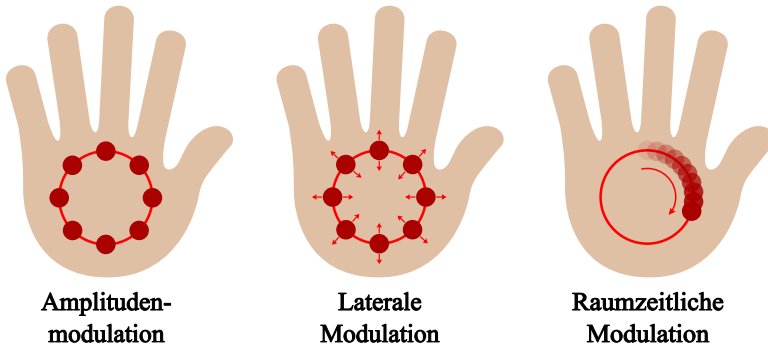


Abbildung 3.9: Visualisierung der verschiedenen Modulationsarten

dabei $f_M = 200 \text{ Hz}$ und führt zu einer periodischen Veränderung des Schalldrucks am Fokuspunkt. Da die Intensität direkt variiert wird, können mehrere Fokuspunkte gleichzeitig realisiert werden. Nachteilig ist, dass die Leistung zwischen allen Punkten aufgeteilt wird, was zu einem schwächeren Schalldruck einzelner Punkte führt und so die haptische Wahrnehmung der Gesamtform schwächt. [66]

3.2.4.2 Laterale Modulation

Dieser Modulationsansatz basiert auf der zeitlichen Verschiebung der Fokuspunkte entlang der Hautoberfläche. Die Amplitude der Fokuspunkte bleibt dabei konstant. Durch ein sehr schnelles sequentielles Verschieben des Fokuspunktmusters entsteht das Gefühl einer geschlossenen Struktur auf der Hautoberfläche. Die Modulationsfrequenz liegt typischerweise im Bereich von 200 bis 1000 Hz. Durch die hohe Frequenz wird eine intensivere haptische Wahrnehmung erzielt als bei der Amplitudenmodulation. Da die dargestellten Fokuspunkte schwingen müssen, wird mehr Platz für die dargestellten Muster gebraucht und die Darstellung von Fokuspunkten, die sehr nah bei einander liegen ist schwer zu realisieren. [75]

3.2.4.3 Raumzeitliche Modulation

Die raumzeitliche Modulation nutzt zur Darstellung von Mustern einen einzelnen Fokuspunkt, der sich mit maximaler Amplitude entlang der Mustergeometrie bewegt. Auch dieses Verfahren nutzt Modulationsfrequenzen im Bereich von 200-1000 Hz, um eine deutliche haptische Wahrnehmung zu realisieren. Durch dieses Modulationsverfahren können auch große und komplexe Geometrien dargestellt werden. Gleichzeitig wird, je größer die Form ist, auch das Gefühl der einzelnen Punkte schwächer, da jeder Punkt des Musters seltener dargestellt wird. [76]

3.3 Nutzendenzentrierte Entwicklung

Die nutzendenzentrierte Entwicklung ist ein etablierter Ansatz in der Produktentwicklung, bei dem die Bedürfnisse, Wünsche und Anforderungen der Nutzenden während des gesamten Entwicklungsprozesses in den Mittelpunkt gestellt werden. Ziel ist es, ein System oder Produkt so zu gestalten, dass es nicht nur funktional, sondern auch intuitiv bedienbar und in der Nutzung angenehm ist. Der Ansatz ist vor allem in der Softwareentwicklung weit verbreitet und wird durch Normen wie der ISO 9241-210 strukturiert [77].

Der nutzendenzentrierte Entwicklungsprozess ist iterativ aufgebaut und verläuft in mehreren Zyklen (vgl. Abbildung 3.10). Am Anfang eines Zyklus steht das Verstehen des Nutzungskontexts, bei dem Nutzende identifiziert werden und die Umgebung und Nutzungsszenarien des zu entwickelten Systems definiert werden. Darauf aufbauend werden Anforderungen aus dem Nutzungskontext abgeleitet. Auf Basis der Anforderungen erfolgt dann die Erstellung von Konzepten und Prototypen. Diese werden iterativ mit den Nutzenden evaluiert und anhand der Rückmeldungen weiterentwickelt. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis alle Anforderungen erfüllt sind und ein nutzungsfreundliches und bedarfsgerechtes System entstanden ist. [78]

Nachfolgend werden verschiedene Konzepte und Methoden der nutzendenzentrierten Entwicklung vorgestellt, die in dieser Dissertation angewendet wurden.

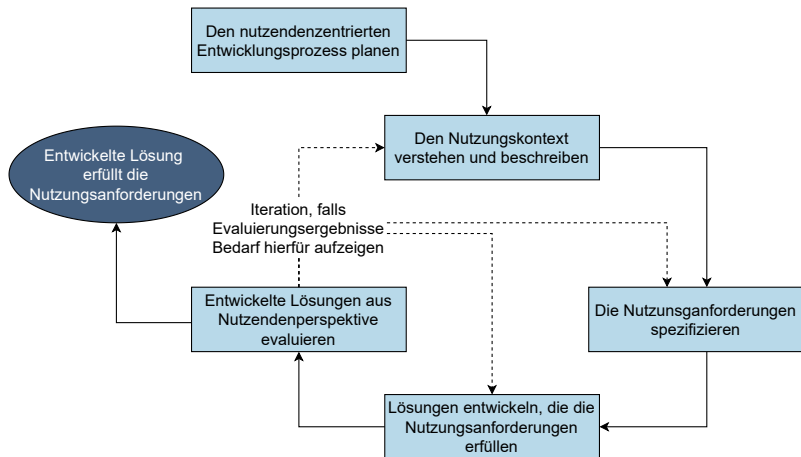


Abbildung 3.10: Aufbau eines iterativen Entwicklungsprozesses nach ISO 9241-210, basierend auf [77]

3.3.1 Personas

Personas sind fiktive, aber datengestützte Nutzende, die einen starken Fokus auf Nutzungsanforderungen und -kontexte ermöglichen. Sie werden in frühen Phasen der Entwicklung erstellt, um ein gemeinsames Verständnis für die Zielgruppen zu schaffen und deren Perspektiven während des gesamten Entwicklungsprozesses systematisch zu berücksichtigen. Sie basieren auf Nutzungsanalysen, Interviews und Beobachtungen und kapseln die Bedürfnisse, Ziele, Verhaltensweisen und Probleme. So ermöglichen Personas Empathie zu entwickeln und Designentscheidungen am tatsächlichen Nutzungsverhalten zu orientieren. Die Verwendung von Personas kann Teams bei der Beantwortung von Fragen wie „Warum bauen wir diese Funktion?“ oder „Wie soll diese Funktion genutzt werden?“ helfen. Eine Persona enthält typischerweise Name, Alter, Ziele, Bedürfnisse, technische Kompetenzen und Herausforderungen der fiktiven Person. [79]

3.3.2 User Stories

User Stories sind kurze, einfache Beschreibungen von Anforderungen oder Funktionalitäten, die aus der Perspektive der Nutzenden erzählt werden. Sie bieten eine prägnante und leicht verständliche Darstellung dessen, was die Nutzenden benötigen.

Ein gängiges Format für eine User Story ist: „**Als [nutzende Person] möchte ich [ein Ziel], damit [Grund/Nutzen]**“. User Stories konzentrieren sich auf die Bedürfnisse der Nutzenden, ohne lange Spezifikationen aufzustellen und sind daher auch für nicht-technische Beteiligte leicht zu verstehen. Sie ermöglichen eine einfache Priorisierung, da sie einzelne Merkmale oder Funktionen darstellen und so nach den Bedürfnissen der Nutzenden, dem Geschäftswert oder anderen Kriterien geordnet werden können. [80]

3.3.3 Design for all

Das Konzept Design for all (auch Universal Design) erweitert den Ansatz der Nutzendenzentrierung um die gesellschaftliche Perspektive. Ziel ist es eine Nutzbarkeit des Systems zu erreichen, die unabhängig von Alter, technischen Fähigkeiten und Einschränkungen der Nutzenden ist. Dabei wird auf eine grundlegende Zugänglichkeit des Gestaltungsprinzips geachtet [81]. Design for all berücksichtigt unterschiedliche sensorische, motorische und kognitive Voraussetzungen und adressiert soziale sowie ethische Aspekte bei der Technologiegestaltung [82]. So wird die Nutzungsqualität und die Marktfähigkeit des Systems gesteigert.

3.3.4 System Usability Scale

System Usability Scale (SUS) [83] ist ein standardisierter Fragebogen zur Bewertung der Nutzbarkeit eines Systems. Er wurde 1986 von John Brooke entwickelt. Zur Bewertung werden im Fragebogen zehn Aussagen über das System gestellt, die von den Nutzenden auf einer 5-Punkte-Likert-Skala von „Stimme überhaupt

nicht zu“ bis „Stimme voll zu“ bewertet werden. Der vollständige Fragebogen ist in Anhang A.1.3 zu sehen. Die Antworten werden in Zahlen von 1 bis 5 umgewandelt und gewichtet. Das Ergebnis ist ein Score zwischen 0 und 100. Abbildung 3.11 zeigt eine mögliche Interpretation des Ergebnisses für die Nutzbarkeit nach [84].

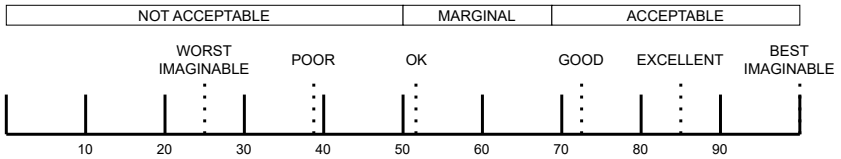


Abbildung 3.11: Interpretation des SUS-Scores nach [84]

4 Stand der Teledermatologie

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand in der Teledermatologie, wobei sowohl bestehende Anwendungen als auch die wissenschaftlich evaluierte Diagnosegenauigkeit der Teledermatologie untersucht werden.

4.1 Übersicht

Definition 4.1.1: Telemedizin

Telemedizin umfasst den Einsatz von digitalen Technologien, um medizinische Informationen zwischen Patient*innen und Ärzt*innen auszutauschen und so auch über Distanz eine Diagnose beziehungsweise Behandlung zu ermöglichen oder zu unterstützen [85].

Definition 4.1.2: Teledermatologie

Die Nutzung von Telemedizin im Bereich der Dermatologie wird als Teledermatologie bezeichnet [86].

Die Teledermatologie ermöglicht es den Dermatolog*innen, Patient*innen-Bilder von Hautkrankheiten aus der Ferne zu betrachten, um diagnostische und therapeutische Entscheidungen zu treffen. Dies kann über verschiedene Methoden erfolgen, darunter klinische Fotos oder Live-Videokonsultationen [4].

Die Teledermatologie bietet die Möglichkeit, den Versorgungszugang vor allem in ländlichen und schlecht angebundenen Gegenden zu verbessern [87]. Zusätzlich

ermöglicht sie eine Kostenersparnis durch die Verringerung von administrativen Kosten [88]. Sowohl Ärzt*innen als auch Patient*innen können durch die Reduzierung von Vor-Ort-Terminen und somit die Reduzierung von Anfahrtswegen und Wartezimmer-Zeiten entlastet werden. Besondere Entlastung kann die Technologie bei der Behandlung und Nachsorge von chronischen Hauterkrankungen wie Psoriasis bewirken. Betroffene Patient*innen benötigen dauerhafte Versorgung mit regelmäßigen Überprüfungen und Anpassungen des Behandlungsplans zur Vermeidung von erneuten Schüben [89]. Hier hat sich Teledermatologie als effektives Mittel bewiesen, das nachweislich die Behandlungskosten senken und gleichzeitig die Lebensqualität der Patient*innen erhöhen kann [90].

Die zwei wichtigsten Ansätze für die teledermatologische Versorgung sind synchrone und asynchrone Teledermatologie.

Definition 4.1.3: Synchrone Teledermatologie

Synchrone Teledermatologie bezeichnet die Nutzung von Echtzeit-Videokonsultationen zwischen Patient*innen und Dermatolog*innen [91].

Die Visite wird bei der synchronen Teledermatologie über eine Videokonsultation durchgeführt. So wird eine direkte Interaktion mit den behandelnden Ärzt*innen ermöglicht. Die betroffenen Hautareale werden mittels Videostream direkt beurteilt. Diese Form der Teledermatologie ermöglicht eine direkte und interaktive Kommunikation, die der persönlichen Untersuchung sehr nahe kommt. Für eine erfolgreiche synchrone Behandlung werden eine gute Internetanbindung, sowie eine ausreichende Kamerabild-Qualität benötigt [92].

Definition 4.1.4: Asynchrone Teledermatologie

Asynchrone Teledermatologie bezeichnet eine Form der teledermatologischen Versorgung, bei der die Kommunikation zwischen Patient*innen und Dermatolog*innen zeitlich versetzt erfolgt [91].

Die asynchrone Teledermatologie stützt sich auf die *Store-and-Forward (SAF)-Technik*. Sie ermöglicht es Patient*innen Fotos und Informationen zu ihren Anliegen über eine bereitgestellte Plattform an Dermatolog*innen zu senden, welche diese Informationen dann zeitversetzt bewerten [92]. Diese Modalität ist besonders weit verbreitet, da sie eine deutliche Zeitersparnis und eine zeitliche Flexibilität im Vergleich zu In-Person-Behandlungen, sowie der synchronen Teledermatologie ermöglicht. Dermatolog*innen können Diagnosen zu ihnen passenden Zeitpunkten treffen und bei Unsicherheiten andere Dermatolog*innen konsultieren. Asynchrone Teledermatologie bietet meist eine höhere Auflösung der bereitgestellten Fotos im Vergleich zur Vorstellung der betroffenen Hautareale in einem Videostream. [91]

4.2 Bestehende Angebote der Teledermatologie

Teledermatologische Anwendungen ermöglichen Patient*innen dermatologische Beschwerden digital beurteilen und behandeln zu lassen. Die Verbreitung dieser Angebote nimmt zwar stetig zu, ihr Anteil an der Gesamtzahl medizinischer Konsultationen bleibt jedoch bislang gering. Eine Studie aus dem Jahr 2020 zeigte beispielsweise, dass in Deutschland nur etwa 5,7 % der dermatologischen Konsultationen teledermatologisch durchgeführt wurden [93].

Der überwiegende Teil der derzeit verfügbaren Angebote basiert auf der asynchronen Teledermatologie. Patient*innen erfassen ihre Beschwerden über eine App oder ein Webportal, indem sie Fotos der betroffenen Hautstellen hochladen und ihre Symptome beschreiben. Anschließend erfolgt der Befund durch eine*n Teledermatolog*in ergänzt um Handlungsempfehlungen.

Die Finanzierung dieser teledermatologischen Angebote erfolgt derzeit in der Regel durch die Patient*innen selbst. Die Preisgestaltung variiert zwischen Festpreismodellen und fallbasierten Abrechnungen. Eine Kostenerstattung durch gesetzliche Krankenkassen erfolgt bislang nicht. Darüber hinaus ist derzeit keine

teledermatologische Anwendung im Verzeichnis der *Digitalen Gesundheitsanwendungen* des *Bundesinstituts für Arzneimittel und Medizinprodukte* gelistet, was die Integration in die Regelversorgung erheblich erschwert. [94]

Zusätzlich bieten bislang nur wenige dermatologische Praxen und Kliniken eine Einbindung teledermatologischer Anwendungen in ihre reguläre Versorgung an. Der Fokus kommerzieller Angebote liegt meist auf der einmaligen Ersteinschätzung, nicht jedoch auf der kontinuierlichen Begleitung chronischer Hauterkrankungen wie Psoriasis oder atopischer Dermatitis. Damit bleiben die potenziellen Vorteile der Teledermatologie, insbesondere in der Langzeitbehandlung chronischer Dermatosen, bislang weitgehend ungenutzt. [4]

4.2.1 Analyse vorhandener Applikationen

Im Folgenden erfolgt eine Übersicht über aktuell verfügbare teledermatologische Applikationen und deren Funktionsumfang.

Nia [95] ist eine App mit künstlicher Intelligenz, die entwickelt wurde, um Menschen mit Ekzemen, insbesondere mit atopischer Dermatitis, zu unterstützen. Sie bietet personalisierte Inhalte und medizinisch validierte Empfehlungen, die nicht an Zeit und Ort gebunden sind (asynchrone Teledermatologie). Die App ermöglicht es den Nutzenden, ihre Gesundheit zu verfolgen und ihre persönlichen Auslöser zu verstehen. Die Nutzenden können betroffene Stellen auf ihrem Körperdiagramm markieren, Fotos machen und den aktuellen Schweregrad ihres Ekzems dokumentieren. Die App ermöglicht auch den direkten Kontakt mit Neurodermitis-Expert*innen, die auf der Grundlage der Eingaben der Nutzenden Empfehlungen aussprechen.

DermEngine [96] richtet sich an Fachärzt*innen und Einrichtungen des Gesundheitswesens. Es handelt sich um eine intelligente dermatologische Plattform, welche die Verwaltung und Analyse von dermatologischen Bildern und Daten erleichtert. Als solche kann sie von Fachärzt*innen zur Verwaltung und Analyse einer breiten Palette von dermatologischen Erkrankungen eingesetzt werden.

Medizinische Einrichtungen, das über keine eigene dermatologische Abteilung verfügt, kann ebenfalls auf **e-Derma Solutions** [97] zurückgreifen. Über die App können telemedizinische Konsultationen, die einen elektronischen Anamnesebogen und Fotos der zu bewertenden Hautareale enthalten, gestellt werden. Durch Dermatolog*innen wird dann eine Diagnose und Therapieempfehlung erstellt.

Derma2Go [98] richtet sich an Patient*innen, die eine dermatologische Beratung benötigen. Sie bietet Online-Konsultationen mit Dermatolog*innen, die Diagnosen, Behandlungspläne und Rezepte erstellen können. Sie kann für eine Vielzahl von Hautkrankheiten verwendet werden, bei denen eine Fernberatung möglich ist. In Fällen, in denen eine körperliche Untersuchung oder ein Eingriff erforderlich ist oder wenn die Erkrankung nicht digital eingeschätzt werden kann, hilft die App den Nutzenden, sich mit den Dermatolog*innen in Verbindung zu setzen.

Little Skindoctor [99] hat einen ähnlichen Funktionsumfang wie die Derma2Go-App, fokussiert sich mit ihrem Angebot aber auf die Behandlung von Kindern.

In der **Dermanostic-App** [100] können Patient*innen Fotos aufnehmen und einen kurzen Fragebogen zu ihrem Gesundheitszustand beantworten. Sie erhalten dann innerhalb von 24 Stunden eine Diagnose, einen Behandlungsplan und ein Privatrezept von Dermatolog*innen. Außerdem kann über die App ein direkter Kontakt zu Dermatolog*innen aufgenommen werden. Die App behandelt eine Reihe von Haut-, Haar-, Nagel- und sexuell übertragbaren Krankheiten. Zu den spezifischen Erkrankungen, die mit Dermanostic behandelt werden, gehören unter anderem Akne, Ekzeme (atopische Dermatitis) und Rosazea.

SkinDoc [101] wurde vom Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz entwickelt und integriert KI-gestützte Analysen in den Diagnoseprozess. Patient*innen können ihre Hautläsionen fotografieren, die dann KI-gestützt analysiert werden und eine Diagnose liefern, sowie die Erklärung der diagnostischen Entscheidungsfindung.

Bei **AppDoc** [102] können Patient*innen über App oder Browser Informationen und Fotos ihrer Hautstellen einsenden und erhalten nach maximal acht Stunden eine Einschätzung und Handlungsempfehlung.

4.2.2 Psoriasis-spezifische Applikationen

Studien zeigen, dass gerade Patient*innen mit chronisch-entzündlichen Hauterkrankungen wie Psoriasis von einem teledermatologischen Angebot profitieren, da chronische Hauterkrankungen einen hohen Behandlungsbedarf über lange Zeit erfordern [92]. Trotz des potenziellen Nutzens von Applikationen, die über eine Erstdiagnose hinausgehen und Patient*innen eine Dokumentation ihrer chronischen Hauterkrankungen ermöglichen, gibt es aktuell nur ein geringes Angebot in diesem Bereich. Nachfolgend sind die bislang vorhandenen Psoriasis-spezifischen Applikationen aufgeführt.

Die **Psoriasis HelferIn Sorea App** [103] nutzt künstliche Intelligenz, um von Psoriasis betroffene Personen zu unterstützen. Die Nutzenden können betroffene Bereiche auf einem Körperdiagramm markieren, Fotos aufnehmen und den aktuellen Zustand ihrer Psoriasis dokumentieren. Zusätzlich kann jeder Schub nach seinem Ausbruch anhand von Skalen und Fotos dokumentiert und die Einschätzung möglicher Auslöser festgehalten werden, um so Muster im Krankheitsverlauf zu erkennen. Über die App können die Nutzenden außerdem direkten Kontakt zu Psoriasis-Expert*innen aufnehmen. Diese Fachleute geben auf der Grundlage der Angaben der Nutzenden konkrete Empfehlungen ab.

Weitere Psoriasis-spezifische Applikationen wurden im Rahmen von Studien entwickelt, um den Einfluss von Teledermatologie auf die Psoriasis-Behandlung zu untersuchen.

- Eine von Banu und Toacse [104] entwickelte Anwendung nutzt klinische Merkmale, um mittels KI eine Psoriasisbestimmung von Dermatosen vorzunehmen. Sie erreichte dabei eine Genauigkeit von mehr als 93 %.
- Eine von Pangti et al. [105] entwickelte und an über 5000 Patient*innen in Indien getestete App zeigte eine hohe Diagnosegenauigkeit für Psoriasis und andere Hautkrankheiten.
- Eine von Trettin et al. [106] entwickelte App mit partizipativem Design unterstützt das langfristige Management von Psoriasis-Patient*innen, die

eine biologische Therapie erhalten, und kann einige Nachuntersuchungen ersetzen.

- Die App DermaScope Mobile hat sich als vielversprechend erwiesen, um die psychische Gesundheit von Psoriasis-Patient*innen zu verbessern, wenn sie monatlich genutzt wird [107].
- Die MDi-Psoriasis-App, die Behandlungsvorschläge auf der Grundlage von Patient*innendaten anbietet, zeigte eine Übereinstimmung von 87,3 % mit den Empfehlungen von Expert*innen [108].

Trotz dieser positiven Aspekte bestehen weiterhin Bedenken hinsichtlich der Qualität und Genauigkeit der angebotenen Apps. Eine Studie aus dem Jahr 2022 evaluierte kommerziell erhältliche Dermatologie-Apps und stellte fest, dass nur wenige Apps eine akzeptable Genauigkeit aufwiesen [109]. Eine weitere Untersuchung aus dem Jahr 2024 berichtete, dass viele Dermatologie-Apps keine ausreichende klinische Unterstützung bieten und oft nicht transparent in Bezug auf die Entwicklung ihrer Algorithmen sind. Dies führt zu einer eingeschränkten Verlässlichkeit der Diagnosen, die durch diese Apps gestellt werden [110]. Eine Untersuchung in [111] ergab außerdem, dass nur 20,5 % der bewerteten Dermatologie-Apps als angemessen für Patient*innen eingestuft werden konnten. Diese Untersuchungen unterstreichen, dass beim Einsatz von Apps im Psoriasis-Management Vorsicht geboten ist.

4.3 Diagnosegenauigkeit

Die Diagnosegenauigkeit teledermatologischer Verfahren wurde bereits in zahlreichen Studien mit unterschiedlichen Studienmethoden, Foto-Standards und betrachtete Hautkrankheiten untersucht. Die Ergebnisse zeigen sehr unterschiedliche diagnostische Übereinstimmungen. Nachfolgend werden die Ergebnisse wichtiger

Studien seit 2004, welche Untersuchungen zur Übereinstimmung zwischen In-Person-Diagnose, teledermatologischer Diagnose und histopathologischer Diagnose durchgeführt haben, vorgestellt und diskutiert. Eine ausführliche Tabelle mit allen Ergebnissen ist in Anhang A.2 zu finden.

4.3.1 Einfluss der Informationsqualität auf die Diagnosegenauigkeit

Mehrere Studien zeigen, dass die Qualität der zur Diagnose herangezogenen Fotos und Informationen einen entscheidenden Einfluss auf die teledermatologische Diagnosegenauigkeit hat. So konnte Oztas et al. [112] bereits 2004 zeigen, dass die Übereinstimmung mit der In-Person-Diagnose bei Bereitstellung von zusätzlichen Informationen deutlich anstieg (von 57 % auf 70 %). Auch spätere Studien wie Nami et al. [7] und Edison et al. [8], die zur Diagnose standardisierte, in der Klinik erstellte Fotos nutzten, erzielten Genauigkeiten von bis zu 91 %. Die Diagnosegenauigkeit fiel in Studien mit klinisch aufgenommenen Fotos meist höher aus als in Studien, in denen Patient*innen die Fotos selbst erstellten. Saade et al. [113] zeigten eine steigende Genauigkeit zwischen Patient*innen-Fotos (79 %), Patient*innen Fotos nach Einweisung (84 %) und klinisch aufgenommenen Fotos (87 %).

4.3.2 Teledermatologische Diagnosen im Vergleich zu histopathologischen Diagnosen

Die Mehrheit der Studien stellte die teledermatologische Diagnose der In-Person-Diagnose gegenüber, obwohl auch diese fehlerhaft sein kann. Einige Studien verwendeten hingegen histopathologische Diagnosen als Vergleichswert. Patel et al. [114] und Clarke et al. [115] zeigten, dass die Übereinstimmung zwischen teledermatologischer Diagnose und histologischer Diagnose bei etwa 65 % lag - eine deutlich niedrigere Übereinstimmung als zwischen In-Person-Diagnose und

histologischer Diagnose mit bis zu 81 %. In beiden Studien wurden durch die teledermatologische Diagnose nicht alle malignen Läsionen zur Biopsie überwiesen, dies kann schwerwiegende Folgen für die behandelten Patient*innen bedeuten.

4.3.3 Diagnosegenauigkeit bei entzündlichen Hauterkrankungen

Eine besonders hohe Übereinstimmung der Diagnosen kann bei entzündlichen Dermatosen beobachtet werden. Giavina-Bianchi et al. [116, 117] erhielten in zwei retrospektiven Studien zu entzündlichen Hauterkrankungen allgemein und spezialisiert atopischer Dermatitis, Übereinstimmungen von 78 % bis 84 %. Auch Artin et al. [118] zeigten in einer Studie zu entzündlichen Manifestationen bei rheumatischen Erkrankungen eine hohe Übereinstimmung mit der histologischen Diagnose von $\kappa = 0,82\text{--}0,95$.

Dennoch wurde Psoriasis in mehreren Studien als besonders herausfordernd identifiziert. Singh et al. [119] verglichen die PASI-Scores und fanden nur moderate Übereinstimmung der teledermatologischen und der In-Person Diagnose mit einem Wert für Cohens kappa zwischen 0,41 und 0,71. Auch bei Nami et al. [7] lag die Übereinstimmung von Psoriasis mit 71,4 % deutlich unter der anderer entzündlicher Hauterkrankungen mit 90 %. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere komplexe Krankheitsformen und atypische Verläufe durch teledermatologische Untersuchungen nicht zuverlässig diagnostiziert werden können.

4.3.4 Sicherheit der Dermatolog*innen im Umgang mit Teledermatologie

Neben der objektiven Übereinstimmung der Diagnosen wurden in verschiedenen Studien auch die subjektive Sicherheit der Dermatolog*innen in ihre Diagnose untersucht. Edison et al. [8] verglichen das Vertrauen der Dermatolog*innen in ihre In-Person-Diagnose und ihre teledermatologische Diagnosen. Während bei 87 % der In-Person-Diagnosen der höchste Vertrauens-Wert angegeben wurde,

erreichten diesen Wert nur 54 % der teledermatologischen Diagnosen. Auch La-sierra et al. [120] zeigten, dass trotz teilweise hoher Übereinstimmungen mit der In-Person-Diagnose nur in 50 der 120 untersuchten Fälle ein hohes Vertrauen in die eigene teledermatologische Diagnose vorherrschte.

4.3.5 Diagnosegenauigkeit im Zeitverlauf

In Abbildung 4.1 ist die Entwicklung der Diagnosegenauigkeit der teledermatologischen Diagnose im Vergleich zur In-Person-Diagnose der betrachteten Studien dargestellt. Es zeigt sich eine tendenzielle Verbesserung der Diagnosegenauigkeit, was sich mutmaßlich auf die technologischen Fortschritte der SAF-Technologie, sowie die Verbesserung der Fotoqualität zurückführen lässt. Auffällig sind jedoch die deutlichen Schwankungen zwischen den einzelnen Studien. So variiert die Genauigkeit zwischen 62 % (Singh et al. [119]) und 91 % (Nami et al. [7]). Auch in jüngeren Jahren zeigen sich deutliche Unterschiede, beispielsweise im Jahr 2024 mit 84 % (Saade et al. [113]) gegenüber 76 % (Patel et al. [114]). Diese Unterschiede können auf eine Vielzahl von Einflussfaktoren zurückgeführt werden, darunter das unterschiedliche Studiendesign, die teilnehmenden Patient*innen sowie die untersuchten Hauterkrankungen.

Insgesamt verdeutlicht die Darstellung, dass die gegenwärtig verfügbaren teledermatologischen Systeme trotz positiver Tendenzen in der Entwicklung noch keine durchgehend hohe und konsistente diagnostische Genauigkeit gewährleisten. Dies unterstreicht die Notwendigkeit weiterer methodischer Diagnosequalitätssicherung und technischer Optimierung, um eine belastbare Alternative zur konventionellen Vor-Ort-Diagnostik sicherzustellen.

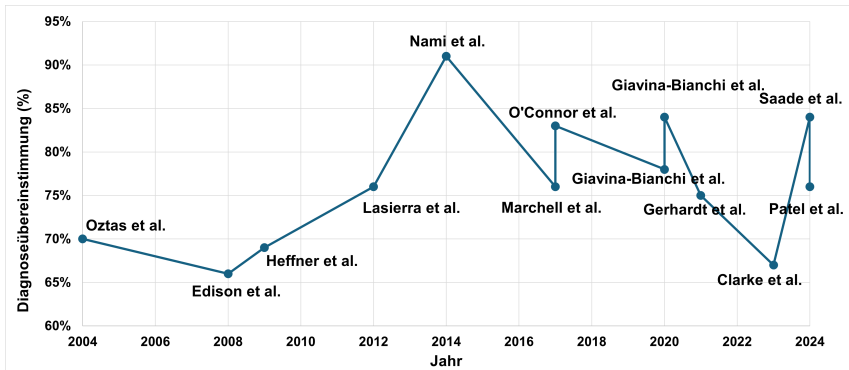


Abbildung 4.1: Diagnosegenauigkeit zwischen In-Person Diagnose und teledermatologischer Diagnose im Zeitverlauf [7, 8, 112–117, 119–124]

4.4 Potenziale und Limitationen teledermatologischer Technologien

Teledermatologische Anwendungen haben das Potenzial, die dermatologische Versorgung zu verbessern. Sie können den Zugang zur Dermatologie in unterversorgten Bereichen ermöglichen, Anfahrts- und Wartezeiten um ein Vielfaches verkürzen und somit Ärzt*innen und Patient*innen entlasten. Gerade bei chronischen Dermatosen, wie Psoriasis, die eine hohe Betreuungsintensität über einen langen Zeitraum benötigen, kann Teledermatologie dazu beitragen, die Vor-Ort-Termine auf die individuellen Bedürfnisse anzupassen. Während die genannten Studien eine vielversprechende Diagnosegenauigkeit zeigen, reicht diese bisher nicht an eine In-Person-Diagnose heran und zeigt erschwerend, dass wichtige Befunde teils nicht entdeckt werden.

Kritisch ist insbesondere, dass schwerwiegende oder komplexe Befunde – etwa maligne Läsionen oder ausgeprägte Psoriasisformen – in einigen Fällen teledermatologisch nicht zuverlässig erkannt wurden. Ein Beispiel hierfür liefert die Studie von Nami et al. [7], die zeigt, dass Psoriasis signifikant schlechter diagnostiziert wird als andere entzündliche Hauterkrankungen. Insbesondere bei komplexen Verläufen scheint die zweidimensionale Bildgebung unzureichend zu sein, da

wichtige morphologische Merkmale wie die Erhebung der Plaques visuell nicht adäquat erfasst werden können.

Nicht nur die Diagnosegenauigkeit bietet Verbesserungspotenzial, auch das Vertrauen der Dermatolog*innen in ihre eigenen teledermatologische Diagnosen muss erhöht werden, um die Akzeptanz und somit die Bereitschaft zur Nutzung von Teledermatologie-Anwendungen zu erhöhen. Die diagnostische Unsicherheit könnte mit dem reduzierten Informationsumfang, der durch die Teledermatologie zur Verfügung gestellt wird, sowie der Qualität dieser Informationen zusammenhängen. Fehlen etwa Kontextinformationen zur Hautveränderung, haptische Eindrücke oder zusätzliche klinische Hinweise oder sind Fotos der betroffenen Hautstellen unscharf oder zeigen nur Ausschnitte der betroffenen Hautareale, kann dies das Vertrauen in die Beurteilung einschränken. Besonders bei unklaren, atypischen oder komplexen Befunden – wie etwa bei schwerer Psoriasis – scheint die Unsicherheit besonders hoch zu sein. Ein höheres Maß an Unsicherheit kann wiederum zu defensiven Entscheidungen führen, etwa durch vermehrte Überweisungen zur Präsenzabklärung oder den Verzicht auf eindeutig definierte Diagnosen. Dies schränkt den Nutzen teledermatologischer Anwendungen im klinischen Alltag ein und unterstreicht die Notwendigkeit, sowohl die diagnostische Informationsgrundlage als auch die Darstellungsformen weiterzuentwickeln.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich ein klares Verbesserungspotenzial durch die Integration von 3D-Informationen in die teledermatologische Diagnostik. Dermatolog*innen nutzen bei der In-Person-Diagnose neben visuellen Informationen in Form einer Blickdiagnose auch haptische Informationen, wie beispielsweise die Erhabenheit und Konsistenz der betroffenen Hautstellen, die durch eine Erastastung erhoben werden. Diese Dimension der Beurteilung fehlt in den aktuell angebotenen Teledermatologie-Anwendungen vollständig. Eine visuell-haptische 3D-Darstellung betroffener Hautareale könnte diese Lücke schließen und diagnostische Erfahrungen ermöglichen, die näher an der klinischen Realität liegen. So könnte die Sicherheit der Dermatolog*innen bei der Diagnose sowie die Diagnosegenauigkeit stark verbessert werden - insbesondere bei Hautveränderungen wie Psoriasis, bei denen 3D-Informationen eine zentrale Rolle spielen.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Dissertation das Ziel ein teledermatologisches Gesamtsystem zu erforschen, das 3D-Informationen integriert. Abgrenzend zu bestehenden Lösungen soll eine umfassendere Begutachtung ermöglicht werden, die sowohl visuelle als auch topologische Merkmale berücksichtigt.

Des Weiteren wird bei der Entwicklung ein besonderer Fokus auf einen nutzendenzentrierten Ansatz gelegt. Dadurch werden die Nutzenden von Beginn an einbezogen, um sicherzustellen, dass das entstehende System für die Zielgruppe geeignet ist und eine hohe sowie langfristige Systemnutzung erreicht. Die folgenden Forschungsfragen bilden dabei den Kern dieser Dissertation:

Forschungsfrage 1

Wie können 3D-Informationen technisch in ein teledermatologisches System integriert werden?

Forschungsfrage 2

Wie müssen visuelle und haptische 3D-Informationen aufbereitet werden, um eine realitätsnahe Abbildung von Hautveränderungen zu ermöglichen?

Forschungsfrage 3

Wie beeinflusst die Anwendung eines nutzendenzentrierten Entwicklungsprozesses die Gestaltung und Wahrnehmung der Nutzbarkeit sowie die Akzeptanz teledermatologischer Systeme?

5 Konzeption eines teledermatologischen Systems zur visuell-haptischen 3D-Darstellung

In diesem Kapitel wird das Konzept für ein erweitertes teledermatologisches System erarbeitet, das eine 3D-Darstellung der Hautareale visuell und haptisch ermöglicht. Dazu sollen 3D-Darstellungen der Hautoberfläche und haptischen Feedback-Ansätzen kombiniert werden, um die teledermatologische Untersuchung möglichst nah an die Bedingungen einer In-Person-Untersuchung heranzuführen.

5.1 Systemidee

Ein klassischer asynchroner Ansatz der Teledermatologie (vgl. Kapitel 4.1) soll durch die Darstellung von 3D-Informationen ergänzt werden, um die diagnostische Qualität der teledermatologischen Versorgung zu erhöhen. Zur Verbesserung der Diagnosegenauigkeit und dem Vertrauen der Dermatolog*innen in ihre Beurteilung soll die Diagnose durch eine visuelle 3D-Komponente unterstützt werden. Diese 3D-Darstellung soll eine umfassendere Betrachtung der betroffenen Hautstellen als konventionelle 2D-Fotos ermöglichen. Während Fotos nur einen starren Blickwinkel und Abstand abbilden, sollen die 3D-Modelle eine Interaktion ermöglichen, durch die beliebige Perspektiven betrachtet werden können. Dies eröffnet den behandelnden Dermatolog*innen die Möglichkeit, die Hautveränderungen ähnlich detailliert zu inspizieren, wie es bei einem physischen

Untersuchungstermin der Fall wäre. Außerdem soll eine haptische Untersuchung ermöglicht werden, welche die Abtastung in Vor-Ort-Terminen simuliert. Dermatologische Merkmale wie die Oberflächenstruktur, Übergänge, Plaque-Erhöhung und Beschaffenheit der Läsionen können so zusätzlich zum visuellen Eindruck haptisch wahrgenommen werden.

5.2 Entwicklungsansatz

Die Entwicklung des teledermatologischen Systems folgt einem nutzendenzentrierten iterativen Ansatz, der sicherstellt, dass die Bedürfnisse der Nutzenden - sowohl Patient*innen als auch Dermatolog*innen - von Beginn an in den Design- und Entwicklungsprozess miteinbezogen werden. So soll eine hohe Anwendungsrelevanz und Akzeptanz gewährleistet werden. Ausgehend von der beschriebenen Systemidee wird zunächst eine Anforderungsanalyse in Zusammenarbeit mit den Nutzenden durchgeführt. Dabei werden die Anforderungen an die einzelnen Systemkomponenten erhoben und systematisch erfasst. Die auf den Anforderungen aufbauende Entwicklung erfolgt in Zyklen. In regelmäßigen Abständen werden die Zwischenergebnisse und Prototypen Nutzenden präsentiert, um Feedback einzuholen und den Erfüllungsgrad der Anforderungen zu ermitteln. Die Rückmeldungen fließen direkt in die Weiterentwicklung ein und ermöglichen eine schrittweise Optimierung des Systems entlang der realen Nutzendenbedürfnisse.

5.3 Anforderungsanalyse

Für die Anforderungsanalyse müssen zunächst die Nutzendengruppen identifiziert werden, die bei der Konzeptionierung und Entwicklung berücksichtigt und einbezogen werden sollen. Für das teledermatologische System ergeben sich folgende Nutzendengruppen:

- ▶ **Psoriasis-Patient*innen:** Diese stehen im Fokus der Entwicklung, da die Behandlung ihrer Erkrankung durch das zu entwickelnde System verbessert und ihre Belastung im Alltag verringert werden soll. Sie agieren als Datengebende im System und erhalten im Gegenzug Diagnosen und Behandlungsempfehlungen.

- ▶ **Dermatolog*innen:** Diese bilden den zweiten Fokus der Entwicklung, da das zu entwickelte System die Dermatolog*innen bestmöglich bei der Diagnose unterstützen soll. Es muss zwischen niedergelassenen Dermatolog*innen in Praxen und Dermatolog*innen an (Universitäts-)Kliniken unterschieden werden, deren Rahmenbedingungen sich teils stark unterscheiden.
 - ▷ **niedergelassene Dermatolog*innen:** Diese arbeiten meist in Einzel- oder Gemeinschaftspraxen und verfügen über begrenzte IT-Ressourcen. Eine Entscheidung, ob und wie viel Teledermatologie genutzt wird, kann Praxis-individuell getroffen werden.

 - ▷ **Dermatolog*innen an (Universitäts-)Kliniken:** Kliniken besitzen meist ein komplexes Krankenhausinformationssystem und stark regulierte IT-Infrastrukturen. Die Nutzung von Teledermatologie muss mit vielen Beteiligten koordiniert werden, dafür sind meist IT-Fachpersonen an der Klinik verfügbar, die bei der Umsetzung unterstützen.

- ▶ **Angehörige der Patient*innen:** Sie spielen eine wichtige Rolle im Krankheits- und Versorgungsprozess. Vor allem minderjährige oder ältere Patient*innen sind auf ihre Unterstützung bei der Nutzung des Systems angewiesen. Sie können die Therapietreue fördern und somit die Systemakzeptanz steigern.

Um die Anforderungen an ein teledermatologisches System mit visueller und haptischer Darstellung von 3D-Informationen zu ermitteln, wurden mehrere Psoriasis-Sprechstunden am Universitätsklinikum Mannheim (UMM) und dem

Universitätsklinikum Würzburg (UKW) begleitet und anschließend mit den Dermatolog*innen nachbesprochen. Beide Universitätskliniken benutzten zum Zeitpunkt der Hospitationen bereits die Teledermatologie-App *DermaScope* (vgl. Kapitel 4.2) im Rahmen einer Patient*innen-Studie. Ziel der Hospitation war es, zum einen den Ablauf der Vor-Ort-Behandlung bei Patient*innen, welche die App nicht nutzten, kennenzulernen. Zum anderen sollte identifiziert werden, in welchen Punkten sich die Behandlung bei den Patient*innen unterscheidet, welche die App nutzten. Außerdem wurde ermittelt, wo die Grenzen des genutzten Teledermatologie-Systems liegen, welche Probleme Dermatolog*innen und Patient*innen bei der Nutzung haben und welche Verbesserungen sie sich wünschen. In Kooperation mit UMM und UKW wurden außerdem zwei Workshops durchgeführt, an denen alle identifizierten Nutzendengruppen teilnahmen. Alle Patient*innen verfügten bereits über Erfahrungen mit teledermatologischen SAF-Anwendungen und wurden zunächst eingeladen, gemeinsam mit ihren Angehörigen frei über ihre bisherigen Nutzungserfahrungen sowie ihre Wünsche und Erwartungen an zukünftige Anwendungen zu berichten. Anschließend schilderten die Dermatolog*innen ihre Perspektiven und Erfahrungen.

Da sich die geäußerten Erfahrungen und Bedürfnisse der Befragten primär auf bereits existierende Anwendungen bezogen, wurde im weiteren Verlauf die Konzeptidee einer 3D-Darstellung der Hautareale vorgestellt. Auch hierzu erhielten die beteiligten Gruppen die Möglichkeit, Anforderungen und Gestaltungswünsche zu formulieren.

Die im Folgenden präsentierten Personas, User Stories und Anforderungen bilden somit zwei inhaltlich miteinander verknüpfte, aber analytisch unterscheidbare Bereiche ab: Zum einen spiegeln sie Anforderungen an bestehende SAF-Lösungen wider, zum anderen beziehen sie sich auf spezifische Erwartungen an die neu konzipierte 3D-Anwendung. Die Ergebnisse werden im weiteren Verlauf nicht strikt getrennt, sondern integriert dargestellt, da inhaltliche Überschneidungen und gegenseitige Bezüge zwischen beiden Themenfeldern bestehen.

5.3.1 Personas

Auf Basis der Hospitationen und Workshops wurden sechs Personas erstellt, welche die gesammelten Bedürfnisse, Ziele und Verhaltensweisen der Nutzenden kapseln.

Die erarbeiteten Personas sind in Tabelle 5.1 bis Tabelle 5.6 dargestellt. *Ingenieurin Ina*, *Alleinerziehender Vater Alex* und *Studentin Sarah* repräsentieren dabei die Patient*innen-Perspektive mit unterschiedlichen Bedürfnissen und Hintergründen, die sich primär auf die App und ihre Funktionen beziehen. Ihre technischen Vorkenntnisse variieren, was sich entsprechend in ihren Erwartungen an die Bedienbarkeit und Funktionalität der App widerspiegelt. Alle Personas erhoffen sich durch die App-Nutzung Zeit in ihrem Alltag einzusparen und Vor-Ort-Termine zu reduzieren.

Die Personas *Niedergelassene Dermatologin Nadine*, *Klinikärztin Katja* und *Assistenzarzt Andreas* stellen die Perspektive der Dermatolog*innen dar. Ihre Anforderungen beziehen sich vor allem auf die Datenanzeige, sowie die neuen Bausteine der 3D-Darstellung. Auch hier zeigt sich ein breites Spektrum an technischer Erfahrung und Vorerfahrung mit teledermatologischen Anwendungen. Zusätzlich wurde berücksichtigt, dass die Dermatolog*innen entweder in einer Praxis oder in (Universitäts-)Klinikstrukturen tätig sind und so unterschiedliche Anforderungen an die teledermatologische Lösung stellen.

Tabelle 5.1: Persona Ingenieurin Ina

Persona	Ingenieurin Ina
Alter	34
Hintergrund	Kürzlich diagnostiziert Stark beruflich eingespannt Technikaffin Verbringt viel Zeit am Smartphone
Wünsche	Grundlagen der Psoriasis verstehen Mobile Verlaufserfassung durch App Unnötige Konsultationen vermeiden
Probleme	Kontrolltermine mit Arbeit vereinbaren Überblick über eigenen Krankheitsverlauf behalten Medizinische Versorgung auf Dienstreisen

Tabelle 5.2: Persona Alleinerziehender Vater Alex

Persona	Alleinerziehender Vater Alex
Alter	48
Hintergrund	Lebt seit vielen Jahren mit Psoriasis mit Gelenkbeteiligung Viele Behandlungen mit unterschiedlichem Erfolg versucht Muss Psoriasis-Therapie mit Arbeit und Kindern vereinbaren
Wünsche	Übersichtliche App Einfache Dokumentation der Symptome Verlässliche Verlaufskontrolle mit Rückmeldung von Dermatolog*innen
Probleme	Komplizierte Apps Lange Anfahrt & Wartezeiten mit Kindern Regelmäßige Dokumentation geht im Alltag immer wieder unter

Tabelle 5.3: Persona Studentin Sarah

Persona	Studentin Sarah
Alter	22
Hintergrund	Als Teenagerin diagnostiziert Engagiert sich in vielen Universitäts-Gruppen Besorgt wegen der sichtbaren Symptome
Wünsche	Schnelle Rückmeldung bei Verschlechterungen der Symptome Diskrete Nutzung der App Überblick über eigenen Hautzustand
Probleme	Lange Wartezeiten bei Kontrollterminen während der Prüfungsphase Stigmatisierung der sichtbaren Symptome

Tabelle 5.4: Persona niedergelassene Dermatologin Nadja

Persona	Niedergelassene Dermatologin Nadine
Alter	60
Hintergrund	Eigene Praxis Konservative IT-Nutzung Jahrelange Erfahrung mit Psoriasis
Wünsche	Wenig Wartungsaufwand Intuitives Design Schnelle und strukturierte Fallübersicht inklusive Verlauf
Probleme	Geringe Verlässlichkeit der Systeme Schlechte Qualität der hochgeladenen Fotos Fehlende Tiefeninformationen auf Fotos

Tabelle 5.5: Persona Klinikärztin Katja

Persona	Klinikärztin Katja
Alter	40
Hintergrund	Tätig an Universitätsklinikum Forschungsbegeistert Digital kompetent
Wünsche	Bessere Darstellung der Plaques Zugriff auf Verlaufswerte Klare Übersicht der wichtigsten Daten für schnelle Entscheidungen
Probleme	Häufige Updates der App Diagnose ohne 3D-Ansicht schwierig Patient*innen ohne technisches Vorwissen für digitale Lösung gewinnen

Tabelle 5.6: Persona Assistenzarzt Andreas

Persona	Assistenzarzt Andreas
Alter	29
Hintergrund	In Facharztausbildung Nutzt gerne technische Tools Möchte Teledermatologie in Klinikabteilung ausbauen
Wünsche	Benutzungsfreundliche Oberfläche Strukturierte Möglichkeit der Diagnose Perspektivenwechsel bei Ansicht
Probleme	Schwankende Qualität der Patient*innen-Fotos Medikamente erhöhen Durchblutung der Haut, dies erschwert Diagnose auf Fotos Bildinformationen für Diagnose oft nicht ausreichend

5.3.2 User Stories

Die folgenden User Stories beschreiben aus Sicht der potenziellen Nutzenden, was sie sich von dem teledermatologischen System wünschen. Sie wurden in die Sicht der Patient*innen und die Sicht der Dermatolog*innen aufgeteilt. Für die Patient*innen stehen die einfache und alltagstaugliche Dokumentation von Symptomen und Krankheitsverläufen mit der Möglichkeit zur fotografischen Erfassung der betroffenen Hautareale im Vordergrund. Diese Dokumentation soll einen Zugang zu individualisiertem Feedback und unterstützenden Informationen ermöglichen. Weitere wichtige Aspekte sind die Nutzbarkeit, Funktionsstabilität sowie die unkomplizierte Installation und Updatefähigkeit der App.

Patient*innensicht:

1. Als Patient*in mit Psoriasis möchte ich durch die App Zeit sparen und unnötige Vor-Ort-Termine mit langen Wartezeiten vermeiden.
2. Als Patient*in mit Psoriasis möchte ich die App nutzen, um meine Symptome und Therapieverläufe bequem zu dokumentieren und zu verfolgen.
3. Als Patient*in möchte ich in der App meinen eigenen Krankheitsverlauf einsehen können, um den Überblick zu behalten.
4. Als Patient*in möchte ich die Möglichkeit haben, Fotos meiner Hautbereiche in der App hochzuladen, um meinem*r Dermatolog*in den Verlauf der Erkrankung besser zeigen zu können.
5. Als Patient*in möchte ich neben Fotos weitere Angaben zu meinem Zustand und meiner aktuellen Belastung machen können.
6. Als Patient*in möchte ich Feedback und Empfehlungen von meinem*r Dermatolog*in auf Basis meiner hochgeladenen Informationen erhalten, um meine Behandlung besser auf meine Bedürfnisse abzustimmen.
7. Als Patient*in wünsche ich mir, dass die App einfach zu bedienen ist und mich nicht überfordert.

8. Als Patient*in möchte ich ein Tagebuch (Foto-Hautdokumentation) meiner Erkrankung führen.
9. Als Patient*in wünsche ich mir, dass die Installation einfach ist und Updates leicht integrierbar sind ohne Neuinstallation.
10. Als Patient*in wünsche ich mir, dass die App eine durchgängige Funktionsfähigkeit hat.

Die Sicht der Dermatolog*innen fokussiert sich auf den effizienten Zugriff auf die Patient*innendaten, die strukturierte Auswertung von Foto- und Verlaufsinformationen sowie ergänzender Funktionen zur Einschätzung der Krankheitsaktivität. Dabei sind sowohl Qualitätsanforderungen an das Bildmaterial als auch die Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzungskontexte in Praxis oder Klinik von Bedeutung.

Dermatolog*innensicht:

1. Als Dermatolog*in wünsche ich mir, dass die wichtigsten Informationen zu den Patient*innen direkt ersichtlich sind.
2. Als Dermatolog*in möchte ich die in der App hochgeladenen Fotos und Informationen der einzelnen Hautbereiche meiner Patient*innen analysieren können.
3. Als Dermatolog*in möchte ich das Teledermatologie-System nutzen, um auf Basis der aggregierten Verlaufsdaten die Schwere der Krankheitsverläufe meiner Patient*innen besser einzuschätzen und entsprechende Behandlungsstrategien zu entwickeln.
4. Als Dermatolog*in wünsche ich mir, dass die Fotoqualität der vom Patient*innen hochgeladenen Fotos gleichbleibend hoch ist bzw. die Patient*innen eine Anleitung für die Fotografie bekommen.
5. Als Dermatolog*in wünsche ich mir, dass ich in den bereitgestellten Daten Informationen über die Plaque-Höhe und Schuppung erhalte.

6. Als Dermatolog*in wünsche ich mir, dass die Patient*innen die App regelmäßig nutzen.
7. Als Dermatolog*in wünsche ich mir, dass das Teledermatologie-System eine durchgängige Funktionsfähigkeit hat.
8. Als Dermatolog*in wünsche ich mir, dass die Installation einfach ist und Updates leicht integrierbar sind ohne Neuinstallation.
9. Als Dermatolog*in wünsche ich mir eine Unterstützung bei der Diagnose durch zusätzliche Informationen neben den bereitgestellten Fotos.
10. Als Dermatolog*in wünsche ich mir verschiedene Perspektiven der Hautstellen betrachten zu können, um so ein ganzheitliches Bild der Erkrankung zu erhalten.
11. Als Dermatolog*in möchte ich direkten Zugriff auf wichtige Funktionen haben, um mich bei hohem Arbeitsaufkommen schnell zurechtzufinden.
12. Als Dermatolog*in möchte ich das Dashboard intuitiv und ohne lange Einarbeitung bedienen können, damit der Einsatz eines neuen Systems nicht zu Mehraufwand führt.
13. Als Dermatolog*in mit wenig Erfahrung im Umgang mit digitalen Systemen möchte ich ein einfach gestaltetes Dashboard ohne komplexe Menüs, damit ich mich schnell zurechtfinde und mich nicht überfordert fühle.

5.3.3 Anforderungskatalog

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Systemübersicht, der erarbeiteten Personas sowie der formulierten User Stories wurden abschließend Anforderungen an das System abgeleitet. Die Anforderungen werden systematisch nach den funktionalen Bausteinen gegliedert, auch wenn diese Bausteine in ihrer konkreten Ausgestaltung erst im Abschnitt 5.4 Konzeptentwicklung eingeführt und hergeleitet werden. Die Gliederung der Anforderungen dient daher zugleich als Begründung

und Vorbereitung für die Systemarchitektur. Sie stellt sicher, dass die konzeptionellen Überlegungen im nächsten Schritt direkt den zuvor strukturierten Bedarf adressieren. Die Anforderungsstruktur antizipiert die spätere Architektur und ermöglicht dadurch einen klaren Übergang zwischen Analyse und Entwurf, ohne eine konzeptionelle Vorwegnahme im engeren Sinne vorzunehmen.

Für die jeweiligen Kernfunktionen der Bausteine wurden funktionale Anforderungen definiert, um deren vollständige und zweckgemäße Leistungsfähigkeit zu gewährleisten. Für alle Komponenten mit Nutzendeninteraktion gelten außerdem explizite Anforderungen an die Nutzbarkeit, um eine einfache, konsistente und intuitive Bedienbarkeit sicherzustellen. Zur eindeutigen Nachvollziehbarkeit und Strukturierung wurden die Anforderungen mit Identifikationsnummern (IDs) versehen und Bereichen zugeordnet. Dies ermöglicht eine klare Referenzierung im weiteren Entwicklungsprozess. Die identifizierten Anforderungen bilden die Grundlage für die Designentscheidungen, die Implementierung sowie die späteren Evaluierungsphasen.

Tabelle 5.7: Anforderungen an die Patient*innen-App

ID	Bereich	Anforderungen
A.1	Nutzbarkeit	Die App muss in einer Nutzbarkeits-Evaluierung mit mind. 10 Testpersonen eine Nutzbarkeit im guten Bereich erzielen (SUS-Score > 71).
A.2	Nutzbarkeit	Die Nutzbarkeits-Evaluierung muss mit einer Personen-gruppe erfolgen, die eine heterogene Abdeckung von je drei unterschiedlichen Altersgruppen, technischen Kom-petenzniveaus und Berufshintergründen gewährleistet.
A.3	Dokumentation	Die App muss eine zeit- und ortsunabhängige Dokumen-tation des individuellen Krankheitsverlaufs ermöglichen.
A.4	Dokumentation	Die App muss eine Funktion zur wöchentlichen Erfassung des DLQI bereitstellen, um die subjektive Krankheitslast quantitativ zu dokumentieren.
A.5	Dokumentation	Die App muss eine Funktion zur Aufnahme von Fotos im-plementieren, die den Nutzenden eine visuelle Verlaufs-kontrolle ermöglicht.
A.6	Daten-visualisierung	Die App muss den Nutzenden eine Visualisierung des erfassten Krankheitsverlaufs bereitstellen.

Tabelle 5.8: Anforderungen an das Dermatolog*innen-Dashboard

ID	Bereich	Anforderungen
D.1	Nutzbarkeit	Das Dashboard muss in einer Nutzbarkeits-Evaluierung mit mind. 10 Testpersonen eine Nutzbarkeit im guten Bereich erzielen (SUS-Score > 71).
D.2	Nutzbarkeit	Die Nutzbarkeits-Evaluierung muss mit einer Personen- gruppe erfolgen, die eine heterogene Abdeckung von je drei unterschiedlichen Altersgruppen und technischen Kompe- tenzniveaus gewährleistet.
D.3	Patient*innen- verwaltung	Das Dashboard muss eine Listenansicht aller Patient*innen bereitstellen, die eine schnelle Identifikation ermöglicht.
D.4	Patient*innen- verwaltung	Das Dashboard muss eine Detailansicht pro Patient*in be- reitstellen, welche alle zugehörigen Stammdaten sowie die medizinischen Verlaufsparemeter vollständig anzeigt.
D.5	Diagnose	Das Dashboard muss den zeitlichen Verlauf der erfassten Krankheitsdaten in Form von Diagrammen oder Graphen visualisieren.
D.6	Diagnose	Das Dashboard muss eine 3D-Darstellung der betroffenen Hautstellen unterstützen.
D.7	Diagnose	Das Dashboard muss alle diagnoserelevanten Metriken und Fotos so darstellen, dass sie als Entscheidungsgrundlage für die dermatologische Diagnose genutzt werden können.
D.8	Diagnose	Das Dashboard muss den aktuellen DLQI-Score sowie des- sen zeitlichen Verlauf anzeigen, um die subjektive Krank- heitslast quantifizierbar darzustellen.

Tabelle 5.9: Anforderungen an die 3D-Modell-Erstellung

ID	Bereich	Anforderungen
M.1	Performance	Die 3D-Modell-Erstellung muss ausschließlich auf Basis von Smartphone-Bildmaterial erfolgen.
M.2	Performance	Die Erstellung der 3D-Modelle muss innerhalb eines Tages abgeschlossen sein.
M.3	Qualität	Die 3D-Modell-Erstellung muss die Hautstelle originalgetreu umsetzen.

Tabelle 5.10: Anforderungen an die visuelle 3D-Darstellung

ID	Bereich	Anforderungen
V.1	Qualität	Die visuelle 3D-Darstellung muss die Hautstelle originalgetreu abbilden.
V.2	Funktionen	Die 3D-Darstellung muss die Betrachtung aus verschiedenen Blickrichtungen ermöglichen.
V.3	Funktionen	Die Anwendung muss eine Zoom-in-Funktion zur Detailbetrachtung ermöglichen.
V.4	Nutzbarkeit	Die visuelle 3D-Darstellung muss in einer Nutzbarkeits-Evaluierung mit mind. 10 Testpersonen eine Nutzbarkeit im guten Bereich erzielen (SUS-Score > 71).
V.5	Nutzbarkeit	Die Nutzbarkeits-Evaluierung muss mit einer Personengruppe erfolgen, die eine heterogene Abdeckung von je drei unterschiedlichen Altersgruppen und technischen Kompetenzniveaus gewährleistet.

Tabelle 5.11: Anforderungen an die haptische 3D-Darstellung

ID	Bereich	Anforderungen
H.1	Haptisches Feedback	Die haptische 3D-Darstellung muss fühlbares Feedback erzeugen, das von mind. 90 % der Proband*innen wahrgenommen wird.
H.2	Haptisches Feedback	Die haptische 3D-Darstellung muss unterschiedliche haptische Formen so darstellen, dass diese von mind. 90 % der Proband*innen unterschieden und korrekt zugeordnet werden können.
H.3	Haptisches Feedback	Die haptische 3D-Darstellung muss geometrische Details bis zu einer definierten räumlichen Auflösung von 1 mm darstellen, sodass Psoriasis-Plaques haptisch erfassbar sind.
H.4	Haptisches Feedback	Die haptische 3D-Darstellung muss eine Regulierung der Feedback-Intensität in mindestens drei diskreten Stufen ermöglichen.
H.5	Betrieb	Die haptische 3D-Darstellung muss eine unterbrechungsfreie Laufzeit von mindestens 6 Stunden gewährleisten, ohne dass ein Neustart der Hardware oder Software erforderlich ist.
H.6	Betrieb	Die haptische 3D-Darstellung muss im Temperaturbereich von 18–28 °C ohne Funktionsverlust arbeiten.
H.7	Nutzbarkeit	Die haptische 3D-Darstellung muss in einer Nutzbarkeits-Evaluierung mit mind. 10 Testpersonen eine Nutzbarkeit im guten Bereich erzielen (SUS-Score > 71).
H.8	Nutzbarkeit	Die Nutzbarkeits-Evaluierung muss mit einer Personengruppe erfolgen, die eine heterogene Abdeckung von je drei unterschiedlichen Altersgruppen und technischen Kompetenzniveaus gewährleistet.

5.4 Konzeptentwicklung

Auf Basis der ermittelten Anforderungen wird nachfolgend ein erweitertes teledermatologisches Gesamtsystem entwickelt, das eine 3D-Darstellung visuell sowie haptisch beinhaltet.

Die Personas und User Stories zeigen auf, dass eine Zeitersparnis einer der wichtigsten Faktoren ist, der Nutzende dazu bewegt ein teledermatologisches System zu nutzen. Aus diesem Grund soll ein asynchrones System aufgebaut werden. Patient*innen können die Daten zu für sie passenden Zeitpunkten aufnehmen und weiterleiten und die Dermatolog*innen können sich diese Daten wiederum zu einem für sie passenden Zeitpunkt anzeigen lassen und bewerten.

Abbildung 5.1 zeigt den Aufbau und die Kommunikation des asynchronen Systems, das die Grundlage für das Systemkonzept darstellt. Dieses wird um weitere Bausteine für die 3D-Darstellung in visueller und haptischer Form erweitert.

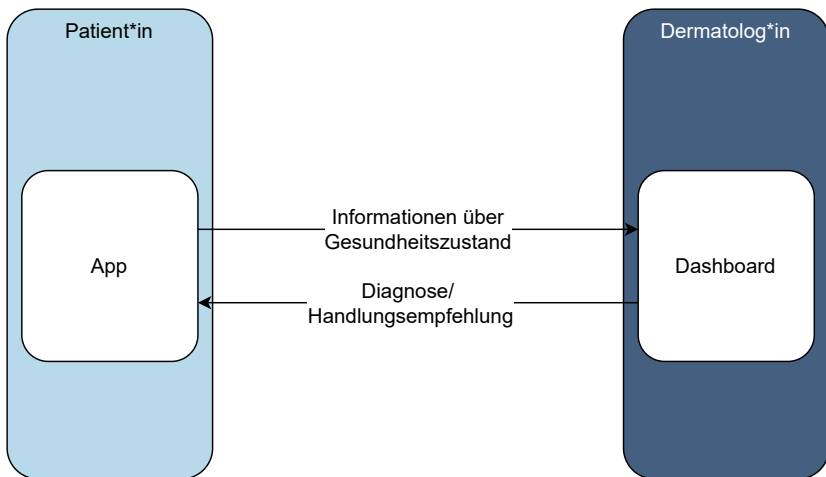


Abbildung 5.1: Asynchrones System als Kernkomponente im Konzept eines erweiterten teledermatologischen Gesamtsystems

5.4.1 App für die Patient*innen zur Datenaufnahme

Wie in den bereits vorgestellten teledermatologischen Systemen (vgl. Kapitel 4.2) soll auch im vorliegenden Konzept eine App zur Erfassung der Gesundheitsdaten auf Seite der Patient*innen eingesetzt werden. Der Einsatz von Apps in der Teledermatologie bietet erhebliche Vorteile, insbesondere vor dem Hintergrund der weit verbreiteten Verfügbarkeit von Smartphones und Tablets in der Bevölkerung. Diese Geräte ermöglichen eine zeit- und ortsunabhängige Dokumentation des Hautzustands durch die Patient*innen selbst (Anforderung A.3).

Durch die App sollen alle Daten erhoben werden, die im System verarbeitet werden. Eine Dokumentation durch die Patient*innen muss dabei mindestens einmal pro Woche erfolgen, um eine lückenlose Dokumentation und damit verbunden die aussagekräftige Auswertung des Verlaufs zu gewährleisten (Anforderungen A.4 und A.5). Die Patient*innen müssen bei jeder Dokumentation in der App bis zu drei Fotos der betroffenen Hautstelle sowie ein Video, das die Hautstelle aus verschiedenen Perspektiven zeigt, aufnehmen. Das Bildmaterial muss den Dermatolog*innen eine Begutachtung der Haut aus der Ferne ermöglichen (Anforderung A.5).

Zusätzlich müssen vor dem Absenden des Bildmaterials zwei Fragebögen, zum einen über den Zustand der Hautstelle und zum anderen den allgemeinen und mentalen Gesundheitszustand, beantwortet werden. Neben der objektiven Dokumentation durch das Bildmaterial, ermöglichen die Fragebögen eine subjektive Bewertung der Erkrankung und dem dadurch empfundenen Leidensdruck, wie sie bei Vor-Ort-Terminen im persönlichen Gespräch erfolgt (Anforderung A.4). Durch die Standardisierung der Fragebögen wird aber gleichzeitig sichergestellt, dass nur die für die Dermatolog*innen relevanten Informationen erfragt werden (Anforderung D.7). So wird auf beiden Seiten Zeit gespart. Diese Daten sollen beim Absenden durch die Patient*innen an ein Backend weitergeleitet werden. Nach der Verarbeitung werden die im Backend ermittelten Fragebögen-Scores an die App zurückgesendet. Die Scores müssen zusammen mit den aufgenommenen Fotos von den Patient*innen eingesehen werden können (Anforderung A.6), damit die Patient*innen einen Überblick über ihren eigenen Krankheitsverlauf haben.

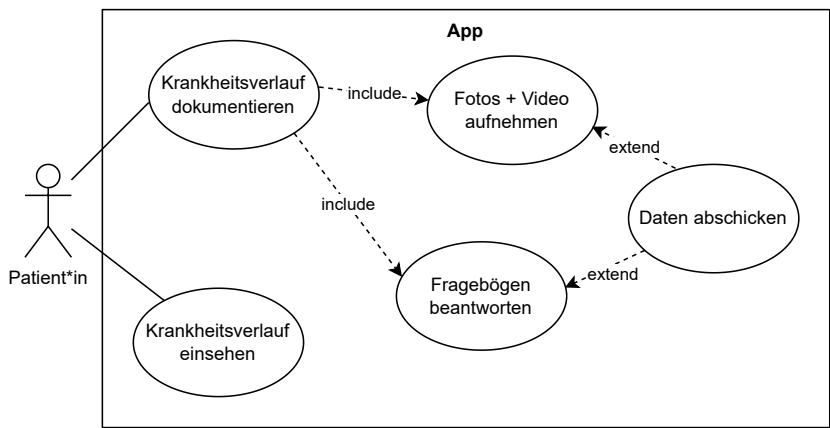


Abbildung 5.2: Use-Case-Diagramm der Patient*innen-App

Tabelle 5.12: Eingabe- und Ausgabedaten der App

App	
Eingabe	Fragebögen-Scores
Ausgabe	Fotos, Video, Fragebögen-Antworten

Abbildung 5.2 zeigt zusammengefasst alle möglichen Interaktionen der Patient*innen mit der App. Die gezielte Reduktion auf essenzielle Funktionen soll zur Nutzbarkeit und Akzeptanz der App beitragen (Anforderungen A.1 und A.2). Eine schlanke, übersichtliche Oberfläche vermindert die kognitive Belastung und erleichtert insbesondere weniger technikaffinen Patient*innen die Orientierung innerhalb der App. Darüber hinaus erhöht eine reduzierte Funktionalität auch die technische Stabilität sowie die Datensicherheit der Anwendung, da weniger potenzielle Fehlerquellen und Angriffsflächen bestehen. Dies ist insbesondere bei sensiblen Gesundheitsdaten von hoher Relevanz.

Tabelle 5.12 gibt eine strukturierte Übersicht über die zentralen Eingabe- und Ausgabedaten der App. Die Ausgabe umfasst alle Daten, die ans Backend gesendet werden. Die Eingabe besteht aus den im Backend berechneten Fragebögen-Scores, die den Patient*innen in der App angezeigt werden.

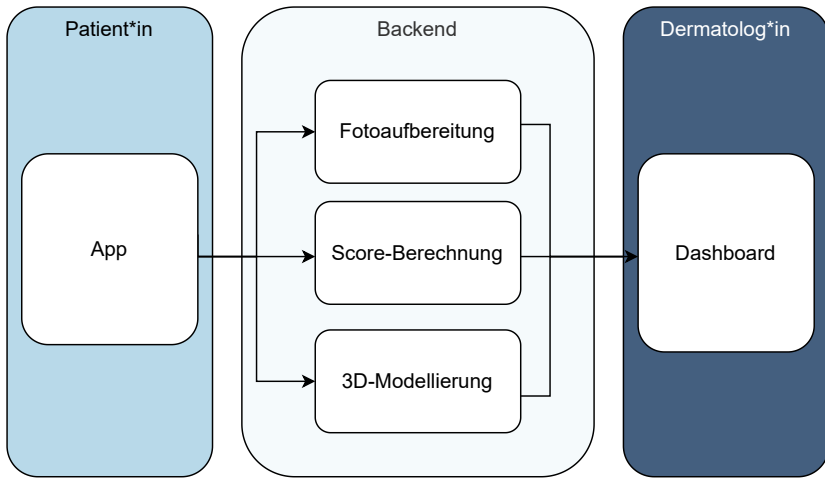


Abbildung 5.3: Erweiterung des Systems um eine Backend-Komponente für die Datenverarbeitung und Modellierung

5.4.2 Backend zur Datenverarbeitung

Die in der App erhobenen Daten werden nicht direkt ans Dashboard für eine Anzeige weitergeleitet, sondern müssen zunächst im Backend verarbeitet werden. Durch drei verschiedene Komponenten, die unterschiedliche Verarbeitungsschritte ausführen, sollen die Daten aufbereitet und die Dermatolog*innen bei der Diagnose unterstützt werden (Anforderung D.7).

In der Komponente **Fotoaufbereitung** sollen die Fotos für die Diagnose durch die Dermatolog*innen aufbereitet werden. Hierzu soll der Hintergrund automatisiert entfernt werden, um den Datenschutz der Patient*innen zu wahren und Dermatolog*innen die Fokussierung auf die gezeigte Hautstelle zu erleichtern.

Auch die Fragebögen-Antworten werden verarbeitet, um die Belastung der Patient*innen quantifizierbar darzustellen. In der Komponente **Score-Berechnung** sollen anhand der Antworten Scores berechnet werden, die eine Auskunft über den Zustand der Patient*innen geben. Diese können die Dermatolog*innen bei der Entscheidung über weitere Behandlungsschritte unterstützen, da sie nicht nur

Aufschluss über den objektiven Zustand geben, sondern auch das subjektive Empfinden der Patient*innen berücksichtigen (Anforderungen A.4 und D.8). So kann eine Aussage über die Dringlichkeit der Behandlungsanpassung getroffen werden und damit die Zufriedenheit der Patient*innen mit dem System und der Behandlung sichergestellt werden.

Um eine haptische und visuelle 3D-Darstellung der Hautstellen zu ermöglichen, müssen zunächst 3D-Modelle der Hautstellen erstellt werden. Hierzu muss die Komponente **3D-Modellierung** ins Backend integriert werden. Die Anforderungen geben vor, dass die Modell-Erstellung innerhalb eines Tages (Anforderung M.2) erfolgen muss. Dies muss bei der Auswahl der Algorithmen berücksichtigt werden. Um 3D-Modelle erstellen zu können, werden Bilddaten der Hautstelle auf verschiedenen Winkeln benötigt. Für eine flexible Anzahl an Fotos aus verschiedensten Winkeln sollen die Patient*innen bei der Datenaufnahme in der App ein Video ihrer betroffenen Hautstelle erstellen, welche die Hautstelle aus verschiedenen Blickwinkeln zeigt. Ein Algorithmus soll dann aus den Videodaten ein 3D-Modell erstellen, das sich sowohl für die visuelle Darstellung als auch ein haptisches Ertasten eignet. Abbildung 5.3 zeigt die Architektur des um das Backend erweiterten Basissystems. Eine Interaktion von Nutzenden mit dem Backend soll nicht stattfinden. Alle Verarbeitungsschritte müssen automatisiert erfolgen, nachdem die Daten aus der App in das Backend eingegangen sind. Tabelle 5.13 listet alle Eingabe- und Ausgabedaten des Backends, sowie die jeweiligen Ein- und Ausgabedaten der einzelnen Komponenten des Backends.

Tabelle 5.13: Eingabe- und Ausgabedaten des Backends

Backend	
Eingabe	Fotos, Video, Fragebögen-Antworten
Ausgabe	Fragebögen-Scores, Fotos (bearb.), 3D-Modell
▷ Fotoaufbereitung	
Eingabe	Fotos
Ausgabe	Fotos (bearb.)
▷ Score-Berechnung	
Eingabe	Fragebögen-Antworten
Ausgabe	Fragebögen-Scores
▷ 3D-Modellierung	
Eingabe	Video
Ausgabe	3D-Modell

5.4.3 Dashboard für die Dermatolog*innen zur Datenvisualisierung

Auf Seite der Dermatolog*innen soll ein Dashboard zum Einsatz kommen, dass den Dermatolog*innen alle gesammelten Informationen zu ihren Patient*innen anzeigt. Das Dashboard muss so gestaltet sein, dass es von verschiedenen Geräten wie PCs, Tablets und Smartphones aufrufbar ist und so unabhängig von der in der Praxis oder Klinik gewählten IT-Lösung einsetzbar ist. Auch das Dashboard muss intuitiv und übersichtlich gestaltet sein, weshalb sich für die Interaktion auf die nötigsten Funktionen konzentriert werden soll (Anforderungen D.1 und D.2). Abbildung 5.4 zeigt die möglichen Use-Cases der Dermatolog*innen mit dem Dashboard. Bei Start des Dashboards soll eine Übersicht aller Patient*innen angezeigt werden (Anforderung D.3). Hier haben die Dermatolog*innen zwei verschiedene Interaktionsmöglichkeiten. Entweder können sie eine*n vorhandene*n Patient*in auswählen, um sich alle Details und den Krankheitsverlauf anzeigen zu lassen oder sie können eine*n neue*n Patient*in anlegen.

Tabelle 5.14: Eingabe- und Ausgabedaten des Dashboards

Dashboard	
Eingabe	3D-Modell, Fotos (bearb.), Fragebögen-Scores
Ausgabe	-

Die Anzeige des detaillierten Krankheitszustandes muss alle durch die Patient*innen aufgenommenen sowie die durch das Backend erstellten Daten beinhalten (Anforderung D.4). Die Anzeige muss zum einen die allgemeinen Patient*innen-Informationen wie Name, Alter, Geschlecht, aktuelle Diagnose, aktuelle Therapie und Therapiestart beinhalten. Außerdem sollen alle bearbeiteten Fotos einsehbar sein. Diese müssen mit einem Datumstempel versehen und nach Aufnahmedatum sortiert sein, damit den Dermatolog*innen eine Einschätzung des Verlaufs möglich ist (Anforderung D.5 und D.7).

Die durch das Backend errechneten Fragebögen-Scores sollen ebenfalls im Zeitverlauf in einem Diagramm dargestellt werden (Anforderung D.5 und D.8). Auch hier ist besonders auf eine leicht verständliche Darstellung der Werte zu achten. Aus der detaillierten Ansicht sollen die visuelle und die haptische 3D-Darstellung gestartet werden können (Anforderung D.6).

Tabelle 5.14 gibt eine strukturierte Übersicht über die zentralen Eingabe- und Ausgabedaten des Dashboards. Unter Eingabe sind alle Daten aufgeführt, die automatisiert nach der Verarbeitung durch das Backend an das Dashboard gesendet werden und dann den Dermatolog*innen angezeigt werden. Das Dashboard hat keine Ausgabe in das System.

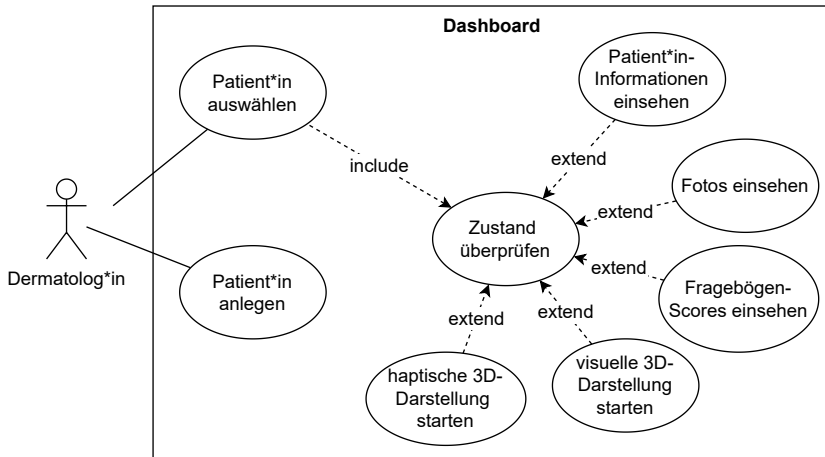


Abbildung 5.4: Use-Case-Diagramm des Dermatolog*innen-Dashboards

5.4.4 Visuelle 3D-Darstellung

Die durch die 3D-Modellierung erstellten Modelle sollen den Dermatolog*innen für eine Untersuchung bereitgestellt werden. Im Dashboard soll eine Übersicht aller für die*den ausgewählte*n Patient*in vorhandenen 3D-Modelle angezeigt werden. Hier kann ein Modell ausgewählt werden, wodurch sich automatisch ein Programm zur Ansicht des 3D-Modells öffnen soll (Anforderung D.6). Das Modell muss mit Computermaus und Tastatur steuerbar sein, wobei die Steuerung möglichst intuitiv umgesetzt werden soll (Anforderung V.4 und V.5). Die Interaktion mit dem Modell muss eine freie Rotation ermöglichen, sodass die Hautveränderungen aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden können (Anforderung V.2). Darüber hinaus muss eine Zoomfunktion die detaillierte Inspektion einzelner Areale ebenso ermöglichen wie eine Gesamtansicht der betroffenen Hautstelle (Anforderung V.3). Die Interaktion soll schwierige Winkel oder tieferliegende Hautveränderungen sichtbar machen, die in 2D nicht ausreichend erkennbar sind. Dies dient der verbesserten diagnostischen Einschätzung und Verlaufskontrolle. Abbildung 5.5 zeigt alle daraus resultierenden Use-Cases der visuellen 3D-Darstellung.

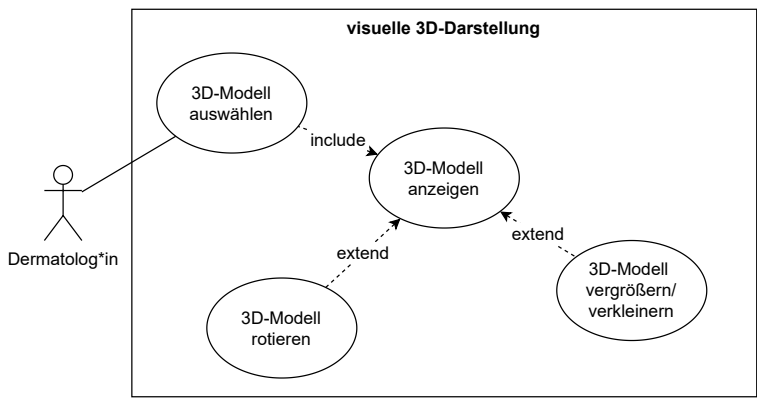


Abbildung 5.5: Use-Case-Diagramm der visuellen 3D-Darstellung

Tabelle 5.15: Eingabe- und Ausgabedaten der visuellen 3D-Darstellung

visuelle 3D-Darstellung	
Eingabe	3D-Modell
Ausgabe	-

Das Programm soll als Eingabe das gewählte 3D-Modell aus dem Backend erhalten. Eine Ausgabe an andere Komponenten des Systems erfolgt nicht, da dieser Baustein lediglich zur Ansicht dient und keine Veränderung der Daten zulassen soll. Tabelle 5.15 fasst die Ein- und Ausgabedaten der visuellen 3D-Darstellung zusammen.

5.4.5 Haptische 3D-Darstellung

Zur Erweiterung der diagnostischen Möglichkeiten soll das Dashboard die Steuerung eines externen haptischen Ausgabegeräts ermöglichen. Im Dashboard soll eine Übersicht aller für die*den ausgewählte*n Patient*in vorhandenen 3D-Modelle angezeigt werden. Hier kann ein Modell ausgewählt werden, welches anschließend durch das angeschlossene Ausgabegerät in eine haptisch erfahrbare Form überführt

Tabelle 5.16: Eingabe- und Ausgabedaten der haptischen 3D-Darstellung

haptische 3D-Darstellung	
Eingabe	3D-Modell
Ausgabe	-

wird (Anforderung H.2). Während die visuelle Repräsentation des Modells parallel im Dashboard angezeigt wird, erlaubt das Ausgabegerät eine haptische Untersuchung der Hautstelle. Die haptische Darstellung soll dabei getreu zur tatsächlichen Hautveränderung erfolgen, um eine möglichst realitätsnahe Einschätzung durch die Dermatolog*innen zu gewährleisten (H.3). Die haptische 3D-Darstellung soll als Eingabewert das ausgewählte 3D-Modell erhalten. Eine Ausgabe ins System soll nicht erfolgen, da durch das Ausgabegerät keine Veränderung am 3D-Modell möglich sein darf. Tabelle 5.15 fasst die Ein- und Ausgabedaten der haptischen 3D-Darstellung zusammen.

5.4.6 Gesamtsystem

Abbildung 5.6 zeigt die Komponenten des resultierenden Gesamtsystems. Auf Patient*innen-Seite kommt eine **App** zum Einsatz, mit der sämtliche für die dermatologische Diagnostik relevanten Informationen erfasst werden können - darunter Fotos, Fragebögen-Antworten sowie Videoaufnahmen für die 3D-Modellierung. Die erfassten Daten werden anschließend an das Backend übermittelt, wo sie durch verschiedene Verarbeitungs- und Analysekomponenten weiterverarbeitet werden. Es erfolgt eine **Fotoaufbereitung** sowie die automatische **Score-Berechnung** aus den Fragebögen-Antworten, die eine strukturierte und objektivierbare Einschätzung des Krankheitszustands ermöglichen. Die resultierenden Daten werden ans **Dashboard** geleitet, wo sie den Dermatolog*innen für die Diagnose bereitgestellt werden. Insbesondere die in der Backend-Komponente **3D-Modellierung** generierten 3D-Modelle werden sowohl in einer **visuellen 3D-Darstellung** als auch in einer **haptischen 3D-Darstellung** dargestellt. Diese beiden Komponenten sollen es Dermatolog*innen ermöglichen, zusätzlich zu den

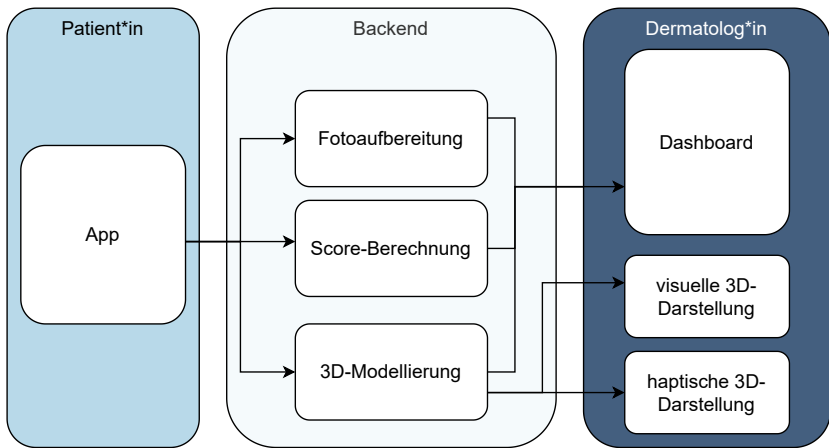


Abbildung 5.6: Übersicht über die System-Komponenten

klassischen 2D-Bildinformationen, eine realitätsnahe 3D-Einschätzung der Hautveränderungen vorzunehmen. Ziel ist es, dadurch die diagnostische Genauigkeit zu erhöhen.

6 Systemische Umsetzung der Datenaufnahme, -verarbeitung und -visualisierung

Nach der Erhebung der Anforderungen und der Konzeptionierung des grundlegenden Aufbaus des Gesamtsystems folgt im nächsten Schritt die technische Umsetzung. Dieses Kapitel beschreibt die Implementierung der Bedienoberflächen (Frontends) für die Datenaufnahme und Datenvisualisierung, sowie die Realisierung der Datenverarbeitung im Backend¹.

6.1 Nutzbarkeits-Betrachtung für die Frontend-Entwicklung

Bei der Entwicklung der beiden Frontends – der Patient*innen-App zur Datenaufnahme und des Dermatolog*innen-Dashboards zur Datenvisualisierung – stand die Nutzbarkeit im Vordergrund. Bereits in der Konzeptionsphase wurden zentrale Kriterien der Nutzbarkeit wie Verständlichkeit, Einfachheit der Navigation und Konsistenz im Design berücksichtigt. Ziel war es, ein einheitliches Erscheinungsbild zu schaffen, das die Zugehörigkeit beider Komponenten zu einem integrierten System verdeutlicht und gleichzeitig die unterschiedlichen Nutzungskontexte optimal unterstützt.

¹ Einzelne der folgenden Abschnitte enthalten inhaltliche Zuarbeiten, die im Rahmen betreuter Abschlussarbeiten [TH1, TH2, TH3] entstanden sind.

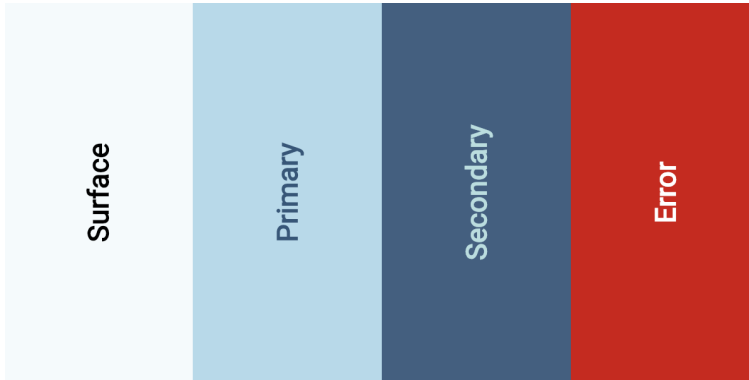


Abbildung 6.1: Farbschema von App und Dashboard

6.1.1 Farbkonzept und Schriftart

Um eine intuitive Nutzung sicherzustellen und die visuelle Zusammengehörigkeit von Dashboard und App zu betonen, wurde ein einheitliches Farbkonzept definiert, das auf alle Interaktionsflächen der Frontends angewendet wird. Für eine intuitive Nutzung lösen gleichfarbige Flächen stets die gleichen Funktionen aus. Abbildung 6.1 zeigt die verwendeten Farben. Als Hintergrundfarbe dient ein sehr heller Blauton (*Surface*), der eine neutrale Grundfläche bildet. Ein etwas kräftigerer Blauton (*Primary*) wird zur Hervorhebung von Überschriften und Interaktionselementen eingesetzt. Ein dunklerer Blauton (*Secondary*) unterstützt zusätzlich die visuelle Strukturierung und hebt Kontraste hervor. Durch den monochromatischen Einsatz in verschiedenen Schattierungen der Grundfarbe entsteht ein harmonisches Erscheinungsbild, das einheitlich und schlicht wirkt und somit die Nutzenden bei der Interaktion nicht überfordert. Für Warnungen und Fehlermeldungen wird ein Rotton (*Error*) verwendet.

Die Farbwahl orientiert sich an der psychologischen Wirkung der einzelnen Farben. Blau vermittelt Vertrauen und Ruhe [125], weshalb es als Grundfarbe gewählt wurde. Rot erregt im Gegensatz dazu Aufmerksamkeit [126] und wird deshalb für Warnungen und Fehlermeldungen genutzt, um eine unmittelbare Wahrnehmung sicherzustellen.

Für die Texte wurde eine serifenlose, nicht-dekorative Schriftart gewählt, die auch in kleiner Schriftgröße eine gute Lesbarkeit gewährleistet. Zum Einsatz kommt die klare, geometrisch konstruierte Schriftart Roboto². Diese quelloffene Schrift wurde für digitale Anwendungen entwickelt und bietet eine Kombination aus Lesbarkeit, Modernität und technischer Optimierung für die Bildschirmdarstellungen.

6.1.2 Technologieauswahl

Die Frontends müssen auf unterschiedlichen Geräten und Betriebssystemen lauffähig sein, um einerseits die Nutzung durch Patient*innen auf verschiedenen Smartphones während der Datenerhebung und andererseits die Verwendung durch Dermatolog*innen auf Tablets oder Desktop-PCs zur Datenvisualisierung zu ermöglichen. Für die Umsetzung der Frontends wurde daher das Framework Flutter³ gewählt. Flutter ermöglicht eine plattformübergreifende Entwicklung, sodass eine Codebasis gleichzeitig für iOS- und Android-Geräte sowie für Web- und Desktop-Anwendungen genutzt werden kann. So wird ein konsistentes Erscheinungsbild unabhängig von Endgerät und Betriebssystem gewährleistet. Flutter verfügt außerdem über eine Vielzahl von verfügbaren Bibliotheken und Widgets, die eine flexible Entwicklung ermöglichen.

6.2 Datenaufnahme

Die Datenaufnahme für das teledermatologische System erfolgt über die Patient*innen-App. Es wurden ausschließlich die Funktionen realisiert, die in Kapitel 5 als notwendige Funktionen definiert wurden. Der Funktionsumfang beschränkte sich somit auf die Datenaufnahme sowie die Einsicht in bereits erhobene Daten.

² aus der Google-Fonts-Bibliothek <https://fonts.google.com/specimen/Roboto>

³ <https://flutter.dev/>

6.2.1 Workflow

Abbildung 6.2 veranschaulicht den in der App implementierten Workflow zur Datenaufnahme. Auf der Startseite werden zunächst die bisher aufgenommenen Daten angezeigt, welche im Detail betrachtet werden können. Bei Start einer neuen Datenaufnahme können die Patient*innen zunächst die betroffene Hautstelle auswählen, für die eine Dokumentation erfolgen soll. Eine Zuordnung der aufgenommenen Daten zu der jeweiligen Hautstelle ermöglicht es den behandelnden Dermatolog*innen bei der Auswertung der Fotos, Fragebögen-Antworten sowie 3D-Modelle unmittelbar den anatomischen Bezug herzustellen. Darüber hinaus können im Dashboard gezielt einzelne Hautstellen über den zeitlichen Verlauf hinweg analysiert werden.

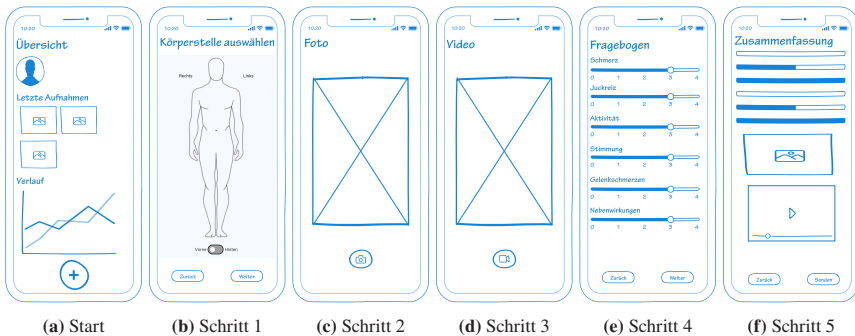


Abbildung 6.2: Workflow in der App bei der Datenaufnahme

Nach Auswahl der Hautstelle wird die Kamera geöffnet, um zunächst ein bis drei Fotos und danach ein Video der ausgewählten Hautstelle aufzunehmen. Zur Sicherstellung einer hohen Qualität und Konsistenz der Aufnahmen werden vor beiden Schritten kurze Anleitungen eingeblendet. Zusätzlich erhalten alle Patient*innen bei der Erstnutzung der App eine Einführung in die korrekte Durchführung der Datenaufnahme. Sowohl die Fotos als auch das Video können nach der Aufnahme überprüft und bei Bedarf erneut aufgenommen werden. Im Anschluss

werden nach einander zwei Fragebögen angezeigt, welche die Patient*innen ausfüllen müssen. Abschließend können alle Daten eingesehen werden, bevor diese übermittelt werden. Es müssen alle Daten aufgenommen werden, um diese abschicken zu können, so dass den Dermatolog*innen möglichst vollständige Daten für die Einschätzung des Krankheitsverlaufs vorliegen. Weitere Funktionen werden nicht implementiert, um den Workflow bewusst schlank und nutzungsorientiert zu halten (Anforderungen D.1 und D.2).

6.2.2 Auswahl der Fragebögen

In der Datenaufnahme sind zwei Fragebögen integriert, die den Patient*innen die Möglichkeit geben, ihre Krankheitslast zu dokumentieren. Sie orientieren sich an PROMs, mit denen Patient*innen ihre Gesundheit, Symptome, Funktionsfähigkeit oder Lebensqualität selbst einschätzen – ohne Interpretation durch Dermatolog*innen. Sie erfassen standardisiert subjektive Aspekte des Krankheitsverlaufs, die durch objektive Messungen, wie Laborwerte oder Fotos, nicht vollständig abgebildet werden.

Fragebogen 1: Erfassung des Hautbefindens

Der erste Fragebogen wurde in enger Zusammenarbeit mit Dermatolog*innen des UKW entwickelt. Grundlage bilden die Fragen, die auch im Rahmen regulärer Vor-Ort-Termine zur klinischen Kontrolle eingesetzt werden. Ziel ist es, den Patient*innen eine strukturierte Möglichkeit zu geben, den subjektiven Leidensdruck sowie das Befinden in Bezug auf die ausgewählte Hautstelle im Verlauf der vergangenen Woche systematisch zu erfassen. Durch die Standardisierung der Erhebung können die Angaben nicht nur unmittelbar in die Diagnose einfließen, sondern auch für die Bewertung des Krankheitsverlaufs genutzt werden. Der Fragebogen besteht aus sechs Fragen, die den Schmerz und den Juckreiz der Hautstelle, die Aktivität und Stimmung der Patient*innen, sowie die Stärke der Gelenkschmerzen und die erlebten Nebenwirkungen abfragen. Der vollständige Fragebogen kann in Anhang A.1.1 eingesehen werden.

Fragebogen 2: Erfassung der Lebensqualität

Der DLQI ergänzt die objektive Dokumentation durch eine standardisierte Erfassung des subjektiven Empfindens der Patient*innen. Die Integration des DLQI unterstreicht den patient*innenzentrierten Ansatz des Systems: Betroffene erhalten die Möglichkeit, ihre subjektive Belastung sichtbar zu machen und aktiv in den diagnostischen Prozess einzubringen. Änderungen im Score lassen Rückschlüsse darauf zu, wie sich der Therapieverlauf auf die Lebensqualität auswirkt. Der vollständige Fragebogen kann in Anhang A.1.2 eingesehen werden.

6.3 Datenverarbeitung

Nach der Datenaufnahme in der App werden die Fotos, das Video und die Antworten der beiden Fragebögen zur ausgewählten Hautstelle an das Backend übermittelt. Hier werden die Daten verarbeitet, bevor sie im Dashboard den Dermatolog*innen visualisiert werden. Das Backend besteht aus drei Hauptkomponenten zur Datenverarbeitung: der Fotoaufbereitung, der Score-Berechnung und der 3D-Modellierung. Die 3D-Modellierung wird in Kapitel 7 im Detail beschrieben.

6.3.1 Fotoaufbereitung

Da die Patient*innen die Fotos eigenständig mit ihren Smartphones aufnehmen, lässt es sich nicht verhindern, dass die Fotos neben den zu untersuchenden Hautpixeln auch Hintergrundpixel enthalten, z. B. Kleidung, Möbel oder andere Objekte. Die Fotos werden im Alltag der Patient*innen aufgenommen, daher kann dabei nicht ausgeschlossen werden, dass im Hintergrund personenbezogene Daten oder andere Personen zu sehen sind. Daher muss der Hintergrund entfernt werden, bevor die Fotos den Dermatolog*innen zur Diagnose angezeigt werden. Für die Hintergrundentfernung wurde eine Verarbeitungs-Pipeline mit drei Schritten implementiert.

Schritt 1: Saliente Objektdetektion mittels InSPyReNet

Zuerst wird die Methode der salienten Objekterkennung (vgl. Kapitel 3.1.2) eingesetzt, da angenommen wird, dass bei Fotos zur Hautdokumentation die Haut im Zentrum der aufgenommenen Fotos ist und im Fokus der Kamera steht. Dafür wird das InSPyReNet-Modell genutzt. Das Ergebnis ist ein Vordergrundbild, das die Bildregionen enthält, die vom Netzwerk als salient erkannt wurden – in diesem Anwendungsfall die Haut.

Schritt 2: Schwellwertsegmentierung mittels Otsu-Methode im LAB-Farbraum

Da InSPyReNet nicht explizit für die Hautsegmentierung trainiert wurde, treten in den resultierenden Bildern ohne Hintergrund teilweise Artefakte auf, wie Kleidungsstücke oder kleinere Objekte. Um diese Artefakte zu reduzieren, erfolgt im zweiten Schritt eine Schwellwertsegmentierung (vgl. Kapitel 3.1.3). Das Bild wird dafür zunächst in den LAB-Farbraum transformiert. Da menschliche Haut in der Regel einen höheren Rotanteil besitzt, ist der A-Kanal hier besonders relevant. Auf diesen Kanal wird die Otsu-Schwellenwertmethode angewendet, ein histogrammbasiertes Verfahren, das den Schwellwert so bestimmt, dass die Varianz innerhalb der beiden Klassen Haut und Nicht-Haut minimiert wird.

Nach der Schwellwertsegmentierung verbleiben mehrere zusammenhängende Objekte. Hier werden nun alle kleineren Objekte unter der Annahme, dass die Haut das größte Objekt darstellt, verworfen, um kleinere Hintergrundobjekte und Kleidung zu entfernen. Abbildung 6.3 zeigt die Ergebnisse der Schritte 1 und 2 der Hintergrundentfernung.

Schritt 3: Fallback-Segmentierung mittels Kantendetektion

Ein Problem bleibt bei Fotos von stark vergrößerten Hautstellen oder sehr großen Hautpartien, wie zum Beispiel Rücken oder Bauch, die das gesamte Foto ausfüllen, bestehen. Hier neigt InSPyReNet dazu, nur die salienten Bereiche, wie zum



Abbildung 6.3: Ergebnisse der Schritte 1 und 2 der Hintergrundentfernung

Beispiel die Psoriasis-Plaques, zu segmentieren und den Rest der Haut zu verwerfen. Um diesem Segmentierungsfehler entgegenzuwirken, wurde eine Fallback-Segmentierung implementiert, die aktiviert wird, wenn durch InSPyReNet weniger als 12 % des Fotos als Haut identifiziert werden. Der Schwellwert wurde datenbasiert auf Grundlage von Patient*innen-Fotos einer Patient*innen-Studie ermittelt. Des Weiteren wird darauf basierend angenommen, dass die Haut mit mindestens zwei Bildrändern verbunden ist und falls Hintergrund im Foto vorhanden ist, dieser durch eine markante Kante vom Vordergrund getrennt ist. Daher wird eine Kantendetektion (vgl. Kapitel 3.1.4) genutzt, um die tatsächlichen Hautpartien zu identifizieren. Zur Umsetzung wird das Holistically-Nested Edge Detection-Netz verwendet. Damit werden alle identifizierten Kanten entfernt, die nicht mit mindestens zwei Bildrändern verbunden sind, da es sich hierbei in der Regel um interne Strukturen (z. B. Plaques oder Details im Hintergrund) handelt. Die verbleibenden Kanten teilen das Foto in mehrere Segmente. Unter der Annahme, dass die Haut das größte Segment darstellt, wird dieses als Hautmaske ausgewählt und alle übrigen Segmente verworfen.

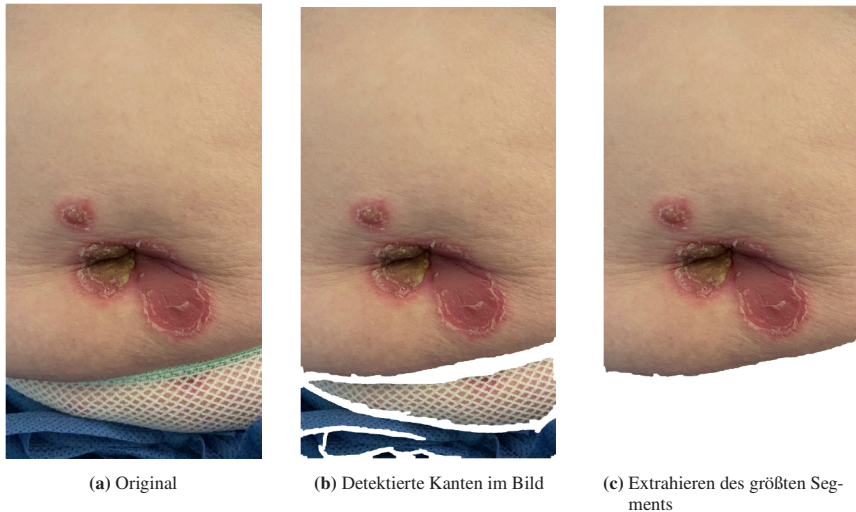


Abbildung 6.4: Ergebnisse von Schritt 3: Fallback-Segmentierung

Abbildung 6.3 zeigt die Ergebnisse der einzelnen Schritte der Fallback-Segmentierung für eine Beispielaufnahme.

Durch die eingesetzte Pipeline können sowohl in regulären als auch in herausfordernden Aufnahmen eine robuste Trennung von Haut und Hintergrund erzielt werden und so der Hintergrund der Aufnahmen erfolgreich entfernt werden.

6.3.2 Score-Berechnung

Da die einzelnen Fragen des Fragebogen 1 zur Erfassung des Hautbefindens thematisch nicht zusammenhängen, würde die Berechnung eines Gesamt-Scores falsche Schlussfolgerungen ermöglichen, weshalb die Antworten einzeln ausgegeben werden. Aus den Antworten des Fragebogen 2 zur Erfassung der Lebensqualität wird der DLQI-Score berechnet, der sich entsprechend der Literatur durch Summation der Punktwerte aus den zehn Items (Antwortmöglichkeiten: 0 = überhaupt nicht,

1 = ein wenig, 2 = ziemlich, 3 = sehr) zu einem Score im Bereich von 0 bis 30 Punkten berechnet (vgl. Kapitel 2.1.1).

6.4 Datenvisualisierung

Das Dashboard stellt die Patient*innendaten in strukturierter Form dar und ermöglicht eine schnelle und ganzheitliche Übersicht über alle aufgenommenen Daten und den Krankheitsverlauf. Die Darstellung des Krankheitsverlaufs für eine fiktive Beispielpatientin Nina Niedlich ist in Abbildung 6.5 zu sehen.

Im oberen Bereich sind die Informationen der Patientin dargestellt, die beim initialen Befund durch die Dermatolog*in vor Ort erhoben wurden. Diese umfassen die Basisinformationen zur Person sowie die Diagnose, Symptome, Vorerkrankungen, Allergien und Medikation. Auf diese Weise sind die Dermatolog*innen unmittelbar über den klinischen Hintergrund informiert.

Darunter befindet sich eine Übersicht über laufende und abgeschlossene Therapien mit Angaben zu Dosierung und Therapiedauer. Diese Struktur unterstützt die Nachvollziehbarkeit des Therapieverlaufs und erleichtert den Abgleich zwischen Therapie und Krankheitsentwicklung (Anforderung D.7).

Ein weiterer Abschnitt visualisiert die dokumentierten Hautbefunde. In einer Körperkarte sind alle Regionen verzeichnet, zu denen Daten vorliegen. Wird eine Region ausgewählt, werden die zugehörigen Daten angezeigt. So können die Angaben und Fotos direkt Hautstellen zugeordnet werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Fotos vergrößert darzustellen und mit einer Lupen-Funktion im Detail zu untersuchen (vgl. Abbildung 6.6). Ergänzend stehen die Antworten zum Fragebogen 1 zur Verfügung, die auf Skalen für Schmerz, Juckreiz, Aktivität, Stimmung, Gelenkbeschwerden und Nebenwirkungen erfasst werden. Diese Angaben bieten Dermatolog*innen einen unmittelbaren Eindruck über das subjektive Befinden der Patient*innen und ergänzen so direkt die objektive Fotodokumentation (Anforderung D.5).

Besonders hervorgehoben ist der DLQI-Verlauf, der als Zeitreihe dargestellt wird



Abbildung 6.5: Ansicht der Patientin Nina Niedlich im Dermatolog*innen-Dashboard

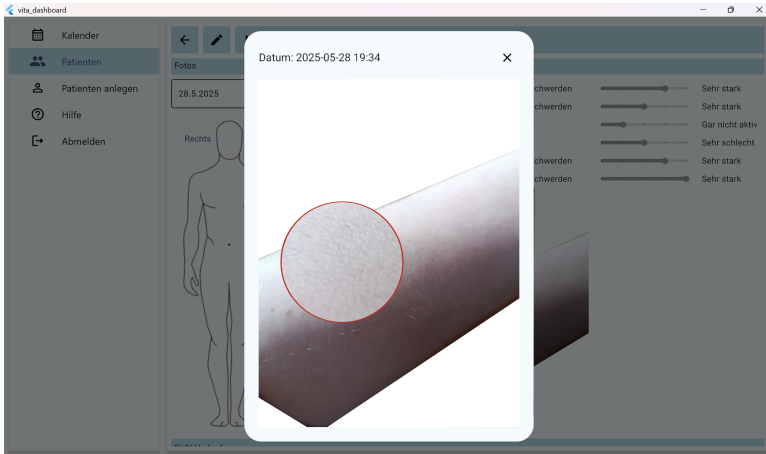


Abbildung 6.6: Optionen zur vergrößerten Ansicht der aufgenommenen Fotos im Dermatolog*innen-Dashboard

(Anforderung D.8). Die grafische Aufbereitung macht Trends und Veränderungen in der Lebensqualität auf einen Blick erkennbar und unterstützt die ärztliche Bewertung im Hinblick auf Therapieerfolg und Krankheitsdynamik. Durch die Kombination von objektiven und subjektiven Daten entsteht eine ganzheitliche Darstellung des Patient*innenzustand. Im untersten Abschnitt kann die haptische sowie die visuelle 3D-Ansicht gestartet werden, die durch externe Programme erfolgen (Anforderung D.6). Eine detaillierte Beschreibung dieser Funktionen erfolgt in den Kapiteln 7 und 8.

Die gewählte Anordnung der Inhalte folgt dabei den Prinzipien der Nutzbarkeit und klinischen Relevanz. Wichtige Stammdaten sind sofort ersichtlich, der Therapieverlauf ist kontextualisiert und die Integration von Bildmaterial, Symptomskalen und Lebensqualitätsmaßen erlaubt es, den Krankheitsverlauf aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu beurteilen. Damit wird eine schnelle Orientierung ermöglicht, die insbesondere im teledermatologischen Kontext entscheidend ist, um ärztliche Entscheidungsprozesse effizient und fundiert zu unterstützen.



Nachname	Vorname	Geburtsdatum TT.MM.JJJJ
Bauer	Mia	30.10.1980
Becker	Ella	08.07.1977
Fischer	Anna	20.01.1975
Graf	Sophie	01.12.2001
Hansi	Hansi	01.06.2000
Klein	Lena	18.12.1982
Koch	Leo	05.03.1990
Lang	Tim	13.02.2002
Meier	Tom	11.11.2000
Muster	Max	15.05.1985
Niedlich	Nina	22.03.1970
Richter	David	14.09.1993
Schmidt	Laura	03.08.1992

Abbildung 6.7: Patient*innen-Übersicht im Dermatolog*innen-Dashboard

6.4.1 Bedienoberfläche und Navigation

Auf Basis des Use-Case-Diagramms in Abbildung 5.4 wird die Informationsarchitektur des Dashboards in zwei Hauptbereiche unterteilt:

- Patient*innen-Übersicht
- Patient*in-Ansicht

Nach dem Anmelden werden die Dermatolog*innen auf die Patient*innen-Übersichtsseite geleitet, die als Startseite dient. Die Patient*innen-Übersicht (Abbildung 6.7) zeigt alle erfassten Patient*innen an und ermöglicht es gleichzeitig einzelne Patient*innen auszuwählen, um zu der detaillierten Ansicht einer Patient*in zu gelangen.

Die Navigation im Dashboard erfolgt über eine dauerhaft sichtbare, seitliche Navigationsleiste, die auf allen Seiten verfügbar ist. Diese ermöglicht den direkten Zugriff auf die Hauptbereiche. Ebenfalls in der Navigationsleiste integriert ist die Option zur Abmeldung vom System.

7 Generierung und Darstellung von 3D-Hautmodellen aus Smartphone-Videos

Aus den Smartphone-Videos der Patient*innen, die mithilfe der zuvor vorgestellten App erhoben wurden, sollen im nächsten Schritt 3D-Modelle generiert und den Dermatolog*innen dargestellt werden. In diesem Kapitel wird der dazu implementierte 3D-Modellierungsprozess vorgestellt und die eingesetzten Verfahren diskutiert. Darüber hinaus wird erläutert, wie die generierten 3D-Modelle in das Gesamtsystem integriert und visuell dargestellt werden.

7.1 Pipeline zur 3D-Modellierung

Für die Generierung der Hautmodelle wurden zunächst mehrere Verfahren aus dem Bereich der 3D-Rekonstruktion untersucht. Ziel war es, basierend auf den in Kapitel 5 identifizierten Anforderungen (vgl. Tabelle 5.9), diejenigen Ansätze auszuwählen, die sowohl technisch realisierbar als auch im Anwendungskontext dermatologischer Bilddaten geeignet sind.

Die in Abbildung 7.1 dargestellte Pipeline zeigt den allgemeinen Modellierungsprozess, der für alle ausgewählten Verfahren umgesetzt wurde¹. Eingabedaten sind die durch die Patient*innen aufgenommenen Videos der betroffenen Hautstellen. Die Qualität der 3D-Modellierung hängt maßgeblich von der Qualität

¹ Einzelne der folgenden Abschnitte enthalten inhaltliche Zuarbeiten, die im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit [TH7] entstanden sind.

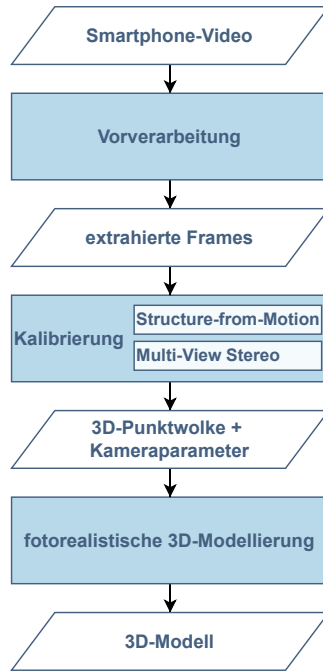


Abbildung 7.1: Pipeline des 3D-Modellierungsprozesses

dieser zu Grunde liegenden Videos ab. Um eine möglichst hohe Aufnahmekonsistenz zu gewährleisten, erhielten die Patient*innen vor der Nutzung der App eine standardisierte Einführung mit Instruktionen zur optimalen Videoaufnahme. Dabei wurde insbesondere auf die Bedeutung einer ausreichenden Beleuchtung sowie einer ausreichenden Anzahl verschiedener Blickwinkel auf die zu erfassende Hautstelle hingewiesen. Anschließend erfolgte die Videoaufnahme durch die Patient*innen eigenständig mit ihren Smartphones.

7.2 Vorverarbeitung

Der Prozess beginnt mit der Vorverarbeitung des Videos, um eine standardisierte und qualitativ hochwertige Datengrundlage zu schaffen. Aus dem Video werden automatisiert Frames extrahiert. Diese Frames werden gleichmäßig über die Videolänge verteilt ausgewählt, um eine repräsentative Abdeckung der Hautstelle aus verschiedenen Blickwinkeln zu erhalten. Eine Anzahl von 70 bis 80 Frames hat sich für den Anwendungsfall als optimal erwiesen. Sie ermöglicht eine hohe Detailtreue der rekonstruierten Modelle, ohne die Berechnungszeit unnötig zu verlängern.

7.3 Kalibrierung

Anschließend wird aus den ausgewählten Frames mithilfe des **SfM**-Verfahrens (vgl. Kapitel 3.1.1.1) eine spärliche Punktwolke generiert. Das Ergebnis ist eine grobe Modellierung der Szene sowie eine Schätzung der Kameraparameter. Abbildung 7.2 zeigt beispielhaft für ein Patient*innen-Video die erzeugte spärliche Punktwolke und in Rot die geschätzten Kameraparameter.

Diese Informationen dienen anschließend als Grundlage für die Anwendung des **MVS**-Verfahrens (vgl. Kapitel 3.1.1.2). MVS erweitert die spärliche Punktwolke um deutlich mehr Punkte, indem es aus mehreren überlappenden Ansichten die Tiefeninformationen für eine große Anzahl von Bildpunkten rekonstruiert. Es entsteht eine dichte Punktwolke, die eine möglichst vollständige und detaillierte Repräsentation der Oberfläche des aufgenommenen Objekts bietet. Abbildung 7.3 zeigt beispielhaft für das Patient*innen-Video die erzeugte dichte Punktwolke.

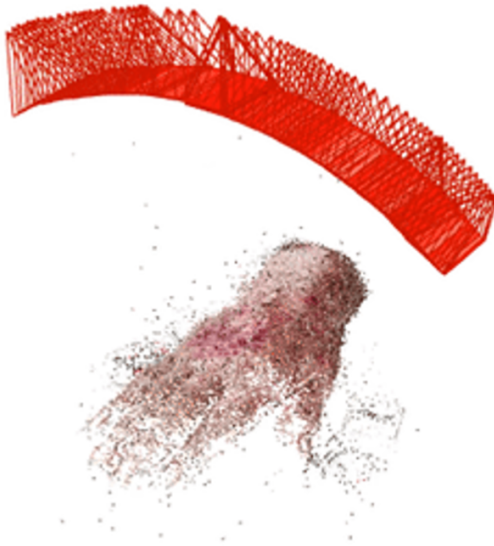


Abbildung 7.2: Ergebnis des SfM-Verfahrens mit in Rot dargestellten Kameraparameter



Abbildung 7.3: Ergebnis des MVS-Verfahrens

7.4 Fotorealistische 3D-Modellierung

Zur Erstellung von realistischen 3D-Modellen aus der zuvor berechneten Punktwolke wurden die drei unterschiedlichen Verfahren **PSR**, **NeRF** und **Gaussian Splatting** implementiert. Diese Verfahren unterscheiden sich grundlegend in ihrer Herangehensweise an die Modellierung von Geometrie, Textur und Lichtverteilung und erlauben einen differenzierten Vergleich hinsichtlich Qualität, Effizienz und Realitätsnähe der erzeugten Modelle für den Anwendungsfall der dermatologischen Diagnostik. So können die Stärken und Schwächen der einzelnen Verfahren im Hinblick auf die in Tabelle 5.9 definierten Anforderungen systematisch untersucht und verglichen werden.

7.4.1 Poisson Surface Reconstruction

PSR (vgl. Kapitel 3.1.1.3) erzeugt aus einer Punktwolke ein glattes, geschlossenes 3D-Modell. Das Verfahren wurde ausgewählt, da es eine hohe Robustheit gegenüber verrauschten Eingabedaten bietet und im Vergleich zu komplexeren KI-gestützten Methoden kurze Rechenzeiten aufweist. Damit adressiert es insbesondere die Anforderungen M.1 und M.2.

Abbildung 7.4 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt eines mit PSR erstellten Modells.

7.4.2 Neural Radiance Field

NeRF (vgl. Kapitel 3.1.1.4) basiert auf neuronalen Netzen, die die Szene als kontinuierliches Strahlungsfeld modellieren. Vorteilhaft ist die Fähigkeit, feine Texturdetails und realistische Oberflächen abzubilden, was im Hinblick auf die Anforderung M.3 besonders relevant ist. Das Modell liefert eine hochdetaillierte und fotorealistische Darstellung der Oberfläche, was auch die Beurteilung von subtilen Hautveränderungen ermöglicht. Da keine Mesh-Struktur entsteht, eignet



Abbildung 7.4: Ergebnis der 3D-Modellierung mit PSR



Abbildung 7.5: Ergebnis der 3D-Modellierung mit NeRF

sich das entstandene Modell für die visuelle Darstellung, aber nicht für die haptische Darstellung, da keine feste Oberfläche entsteht, die ertastet werden kann, stattdessen besteht das Modell aus einer Vielzahl von Strahlen. Für eine haptische Untersuchung muss das Modell zunächst in ein physisch ertastbares Format umgewandelt werden, was zusätzliche Ressourcen benötigt. Abbildung 7.5 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt eines mit NeRF erstellten Modells.



Abbildung 7.6: Ergebnis der 3D-Modellierung mit Gaussian Splatting

7.4.3 Gaussian Splatting

Gaussian Splatting (vgl. Kapitel 3.1.1.5) ist eine Weiterentwicklung der punkt-basierten Modellierung und ermöglicht eine sehr effiziente und zugleich hoch-realistische Modellierung. Es vereint die Vorteile schneller Berechnung (M.2) mit der Fähigkeit, fotorealistische Texturdetails in Echtzeit darzustellen (M.3). Auch beim Gaussian Splatting entsteht keine Mesh-Struktur. Daher eignet sich auch dieses Verfahren zur realistischen visuellen Darstellung, jedoch nicht für die haptische Interaktion. Anstelle einer festen Oberfläche, die ertastet werden könnte, besteht das Modell aus einer Vielzahl von Gaussians, die lediglich die optische Erscheinung abbilden. Für eine haptische Untersuchung muss auch hier das entstandene Modell zunächst in ein physisch ertastbares Format umgewandelt werden, was zusätzliche Ressourcen benötigt. Abbildung 7.6 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der Gaussian Splatting-Modellierung.

7.5 Visuelle Darstellung der generierten 3D-Modelle

Für die visuelle Darstellung der generierten 3D-Modelle wurde zunächst eine Auswahl verfügbarer Softwarelösungen analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung überprüft. Auf Grundlage der definierten Anforderungen fiel die Wahl auf das Softwarepaket CloudCompare². CloudCompare ist ein plattformunabhängiges Open-Source-Tool, das sich auf die Visualisierung und Analyse von 3D-Punktwolken und polygonalen Netzen spezialisiert. Es unterstützt eine Vielzahl gängiger Formate, darunter insbesondere das Polygon-Dateiformat (.ply), und ermöglicht die interaktive Untersuchung der geladenen Modelle durch Rotation- und Zoom-Optionen (Anforderungen V.2 und V.3).

Neben der reinen Darstellung bietet CloudCompare umfangreiche Funktionen zur Analyse und Verarbeitung von 3D-Daten, wie etwa Segmentierung, Distanzmessungen, Oberflächenvergleiche oder die Extraktion von Querschnitten. Diese Eigenschaften machen die Software besonders geeignet für eine dermatologische Evaluierung der erzeugten Modelle, da sowohl qualitative als auch quantitative Analysen innerhalb derselben Umgebung durchgeführt werden können.

Die implementierten Modellierungsansätze liefern spezifische Repräsentationen der rekonstruierten Szene, die sich hinsichtlich der zugrundeliegenden Datenstrukturen und des Speicherformats unterscheiden. Um eine einheitliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden alle Verfahren so aufbereitet, dass die resultierenden Modelle in das .ply-Format überführt und anschließend in CloudCompare visualisiert werden konnten.

Das Ergebnis der PSR liegt bereits als dreidimensionales Mesh vor, das direkt in das .ply-Format exportiert werden kann. Dieses enthält sowohl die geometrische Information als auch Farbwerte und ist damit unmittelbar kompatibel mit Visualisierungswerkzeugen wie CloudCompare.

Im Gegensatz dazu liefert NeRF keine explizite Geometrie, sondern eine implizite Szenenrepräsentation in Form eines kontinuierlichen Strahlungsfelds. Zur weiteren

² <https://www.cloudcompare.org/>



Abbildung 7.7: Auswahl eines 3D-Modells zur Ansicht im Dashboard

Verarbeitung wird aus dem trainierten Modell ein diskretes Oberflächenmodell extrahiert. Dies erfolgt durch volumetrisches Sampling des Dichtefeldes und die anschließende Anwendung eines Isofläche-Extraktionsverfahrens, dem Marching-Cubes-Algorithmus. Das resultierende Mesh kann nachträglich trianguliert und im .ply-Format gespeichert werden. Auf diese Weise wird aus der ursprünglich impliziten Darstellung ein explizites Flächenmodell.

Das Verfahren des 3D-Gaussian-Splatting basiert auf der Repräsentation der Szene durch eine Menge Gaussians. Für die Darstellung in CloudCompare ist eine Approximation erforderlich, da das Modell nicht unmittelbar durch Standard-3D-Dateiformate unterstützt wird. Hierfür werden die Gaußschen Ellipsoide durch diskrete Punktwolken approximiert, wobei die Dichte der Abtastung proportional zur Kovarianz der jeweiligen Gaussians gewählt wird. Diese Punktwolken können dann direkt in das .ply-Format exportiert und anschließend in CloudCompare geladen werden.

7.6 Integration in das Gesamtsystem

Die visuelle 3D-Darstellung wurde in das entwickelte Gesamtsystem integriert und kann direkt aus dem Dermatolog*innen-Dashboard gestartet werden. Im Dashboard wird dazu zunächst ein 3D-Modell zur Ansicht ausgewählt. Über den Button *Ansicht* (Abbildung 7.7) öffnet sich das externe Programm CloudCompare, das automatisiert das ausgewählte 3D-Modell lädt und anzeigt (Abbildung 7.8).

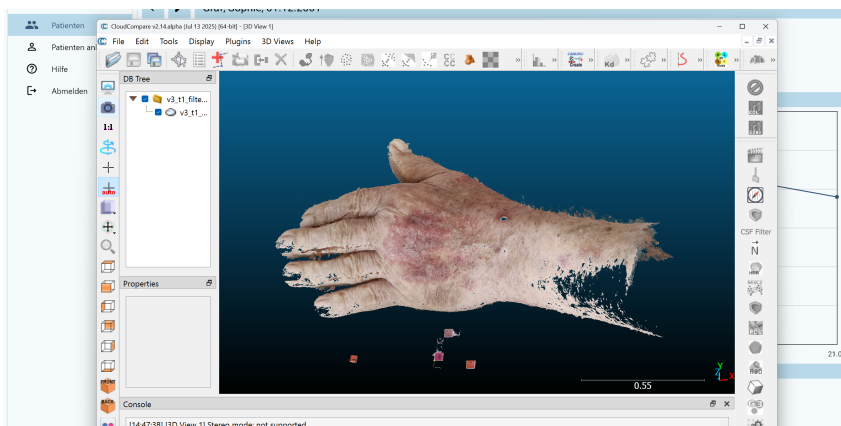


Abbildung 7.8: Ansicht eines 3D-Modells nach Auswahl im Dashboard

8 Entwicklung des haptischen 3D-Ausgabesystems

Die Erzeugung von haptischem Feedback zur Übermittlung von Informationen bildet die zentrale Komponente der haptischen 3D-Darstellung. Nachfolgend wird beschrieben, wie bei der Entwicklung des 3D-Ausgabesystems vorgegangen wurde und welche Technologien und Komponenten dabei zum Einsatz kommen.

8.1 Technologieauswahl

Für die Realisierung eines solchen haptischen Ausgabesystems stehen verschiedene technische Ansätze zur Verfügung:

- **Vibration:** Vibrationsmotoren erzeugen durch schnelle Bewegungen haptische Signale, die typischerweise als periodische Reize wahrgenommen werden. Diese Methode ist technisch einfach umzusetzen und weit verbreitet, eignet sich jedoch primär zur Signalisierung von Ereignissen oder zur Unterscheidung von Oberflächenstrukturen mit niedriger räumlicher Auflösung. [127]
- **Force Feedback:** Diese Methode verwendet mechanische Aktoren, um Widerstände oder Kräfte auf den Nutzenden auszuüben. Force Feedback kann die Interaktion mit virtuellen Objekten physikalisch realistisch nachbilden, ist jedoch oft sperrig und mechanisch komplex, was die Miniaturisierung für berührungsbasierte Interfaces erschwert. [128]

- Luft- oder Flüssigkeitsdruck: Druckveränderungen in Luft- oder Flüssigkeitskammern können lokal taktile Reize erzeugen. Solche Systeme sind prinzipiell in der Lage, punktuelle oder flächige Deformationen zu erzeugen, benötigen jedoch komplexe Fluidiksysteme und sind in der Regel träge in der Reaktionszeit. [129]
- Elektrische Stimulation: Über Elektroden auf der Haut können Stromimpulse gezielt Nervenreize auslösen, was eine direkte Stimulation des haptischen Systems ermöglicht. Trotz ihrer Präzision ist diese Methode mit Risiken wie Hautirritationen und Angst von Nutzenden vor Stromschlägen verbunden. [130]
- Thermische Aktuatoren: Über thermoelektrische Elemente können Temperaturveränderungen erzeugt werden. Diese Methode kann zur Ergänzung von haptischen Eindrücken, z. B. in VR-Spielen genutzt werden, ist alleine jedoch nicht geeignet zur Darstellung von topologischen Eigenschaften. [131]
- Ultraschall-Haptik: Hier werden überlagerte Ultraschallwellen genutzt, um Fokuspunkte zu bilden, die einen haptischen Reiz auf der Hautoberfläche erzeugen. Die Technologie ermöglicht die Erzeugung von fühlbaren Punkten, Linien oder Mustern in der Luft und lässt sich mit visuellen Elementen präzise synchronisieren. Der spürbare Effekt ist allerdings nur in einem kleinen Fokusbereich spürbar, in dem sich die Ultraschallwellen überlagern. [64]

Für den Aufbau des Ausgabesystems, das dermatologische Befunde haptisch erfahrbar machen soll – insbesondere zur Simulation von Hautveränderungen wie Verhärtungen, Erhebungen oder unregelmäßigen Oberflächenstrukturen – wurde die Methode der Ultraschall-Haptik gewählt. Im Vergleich zu den oben genannten Alternativen bietet Ultraschall mehrere entscheidende Vorteile. Ultraschall-Haptik ermöglicht haptische Wahrnehmung ohne physische Berührung des Geräts. Verschiedene Dermatolog*innen können das gleiche Ausgabesystem nutzen - beispielsweise zur Einholung einer Zweitmeinung im Diagnoseprozess – ohne dass zwischenzeitliche Desinfektionsmaßnahmen oder vergleichbare Hygieneschritte

erforderlich sind. Die präzise Steuerung der Fokuspunkte erlaubt die Darstellung komplexer Texturen und topografischer Veränderungen der Haut. Die Technologie kann mit optischen Displays kombiniert werden, wodurch visuelle und haptische Informationen synchron präsentiert werden können. Im Gegensatz zu elektrischer Stimulation oder mechanischem Force Feedback ist Ultraschall-Haptik weitgehend frei von unangenehmen Nebenwirkungen und gut auf unterschiedliche Hauttypen anpassbar.

8.2 Aufbau des Ultraschall-Phased-Arrays

Als Basis für das haptische Ausgabesystem wurde ein von der Forschungsgruppe Upnalab der Universität Navarre im Rahmen des Projekts „SonicSurface“ [132] entwickeltes Ultraschall-Phased-Array (UPA) genutzt. Das UPA kann für das Schweben leichter Partikel oder für haptische Feedback-Anwendungen verwendet werden (Anforderung H.1) und verfügt über die Möglichkeit, die Intensität des haptischen Feedbacks über die Spannung zu variieren (Anforderung H.4).

Bei SonicSurface handelt es sich um ein öffentlich zugängliches Projekt, bei dem die benötigten Materialien, Bauanleitungen, Platinenlayout sowie benötigten Quellcodes online bereitgestellt werden¹. Das UPA besteht aus 256 Ultraschallwandlern in einer 16x16 Gitteranordnung. Abbildung 8.1 zeigt das aufgebaute UPA.

Die wichtigsten im UPA verwendeten Bauteile sind der Tabelle 8.1 zu entnehmen. Bei diesem UPA beträgt die Frequenz aller Ultraschallwandler 40 kHz. Die Ansteuerung erfolgt über einen PC, welcher die Ansteuersignale an ein FPGA-Modul sendet. Dort wird das Signal auf 32 Schieberegister weitergeleitet, welche wiederum jeweils acht MOSFET-Treiber ansteuern. Erreicht das Ansteuersignal

¹ <https://github.com/upnalab/SonicSurface>

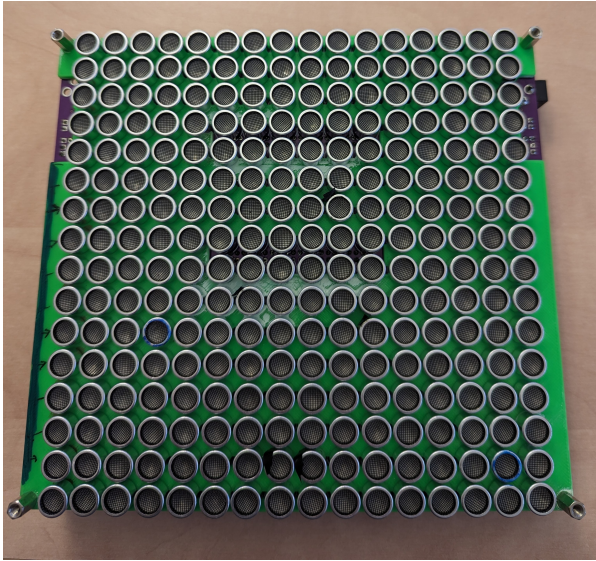


Abbildung 8.1: UPA Prototyp

die MOSFET-Treiber wird an den Anschlüssen der einzelnen Ultraschallwandler mit einer Frequenz von 40 kHz zwischen 0 V und 20 V geschaltet, wodurch Ultraschall entsteht. Abbildung 8.2 zeigt das Signalfussdiagramm des UPAs.

Bei maximaler Überlagerung der Ultraschallwellen an einem gewünschten Punkt ist die in der Luftschwingung gespeicherte Energie als Vibration auf der Haut spürbar. Aus diesem Grund kann das UPA durch gezielte Modulation der einzelnen Phasenverschiebungen für haptische Feedback-Anwendungen genutzt werden.

Bauelement	Modellbezeichnung / Parameter	Anzahl
Leiterplatte (PCB)	183 × 169 mm, 2 Lagen	1
FPGA	Waveshare CoreEP4CE6	1
Mikrocontroller	Arduino Nano	1
Ultraschallwandler	MSO-P1040H07T	256
MOSFET-Treiber	MIC4127 (SOIC-8)	128
Schieberegister	74HC595 (SOIC-16)	32
Keramikkondensator	100 nF, 50 V, Baugröße 0805	160

Tabelle 8.1: Bauteilliste des SonicSurface.

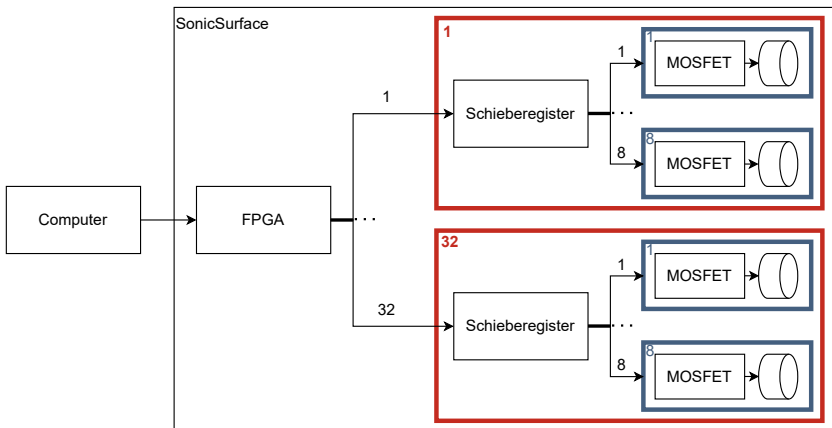


Abbildung 8.2: Schematischer Aufbau des SonicSurface, basierend auf [132]

8.2.1 Optimierung des Ultraschall-Phased-Arrays

Da der primäre Schwerpunkt des SonicSurface-Projekts auf der Objektlevitation liegt, deckt das dort entwickelte UPA allerdings nicht alle identifizierten Anforderungen ab. Da es hier als haptisches Ausgabesystem zum Ertasten von Hautpartien

eingesetzt werden soll, wurden verschiedene Optimierungen vorgenommen, um die Fühlbarkeit der durch das Board dargestellten 3D-Modelle zu verbessern².

8.2.1.1 Erhöhung der Phasenmodulationsfrequenz

Die Phasenmodulationsfrequenz beschreibt in diesem Kontext die Rate, mit der die Fokuspunkt-Koordinaten pro Sekunde aktualisiert werden. Bei einer Frequenz von 100 Hz können beispielsweise 100 Fokuspunkte in einer Sekunde angesteuert werden. Da die 3D-Modelle der Hautstellen aus einer hohen Anzahl an Punkten bestehen, ist eine niedrige Frequenz nicht ausreichend für eine flüssige Darstellung der Modelle. Ist die Frequenz zu gering, wird jeder Punkt des Modells seltener als einmal pro Sekunde aktualisiert. Dies führt zu einem wahrnehmbaren Pulsieren, was die haptische Erkennbarkeit des Modells stark erschwert (vgl. Anforderung H.2 und H.3).

Die Daten werden über eine serielle Schnittstelle RS-232 an das FPGA übertragen. Die Datenrate im SonicSurface-UPA beträgt standardmäßig 230,4 kBd, was die Erzeugungsrate neuer Formen limitiert. Für jeden der 256 Wandler werden insgesamt 10 Bit übertragen (1 Startbit, 1 Stoppbit sowie 8 Bit Phaseninformation). Bei 256 Wandlern müssen für einen Fokuspunkt $256 \times 10 \text{ Bit} = 2.560 \text{ Bit}$ übertragen werden.

Für die Datenrate von 230.400 Bit/s ergibt sich damit eine maximale Phasenmodulationsfrequenz von:

$$\frac{230.400 \text{ Bit/s}}{2.560 \text{ Bit}} = 90 \text{ Hz} \quad (8.1)$$

Eine optimale haptische Wahrnehmung wird bei einer Frequenz von 200 Hz erreicht (vgl. Kapitel 3.2.4). Diese Frequenz erfordert eine theoretische Datenrate von:

² Einzelne der folgenden Abschnitte enthalten inhaltliche Zuarbeiten, die im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit [TH4] entstanden sind.

$$200 \text{ Hz} \times 2.560 \text{ Bit} = 512.000 \text{ Bd} \quad (8.2)$$

Da dieser Wert mit der ursprünglichen Konfiguration nicht erreichbar war, wurde die Übertragungsrate sowohl auf der Senderseite (PC) als auch auf der Empfängerseite (FPGA) angepasst. Hierzu wurde der von Upnalab bereitgestellte FPGA-Quellcode in *Quartus Prime* modifiziert, um die Empfangsbaudrate von 230,4 kBd auf 518,4 kBd anzuheben (Faktor 2,25). Nach dieser Anpassung konnte die Phasenmodulationsfrequenz entsprechend auf 202 Hz gesteigert werden, was zu einer deutlich verbesserten Kontinuität und haptischen Wahrnehmbarkeit der 3D-Modelle führte.

8.2.1.2 Erweiterung um ein Handtracking-Modul

Die Gesamtleistung des UPAs ist bei raumzeitlicher Modulation zeitlich verteilt. Daraus folgt, dass bei steigender Anzahl der Fokuspunkte die Aufenthaltszeit an den einzelnen Punkten der Form abnimmt. Dies führt dazu, dass die fühlbare Intensität pro Fokuspunkt abnimmt. Komplexe Modelle mit mehr als 100 Fokuspunkten sind dadurch nur schwach zu spüren. Verschiedene wissenschaftliche Arbeiten empfehlen die Erweiterung um eine Handtracking-Kamera [74, 133]. Durch die Kamera kann die Position der Hand über dem Board erfasst werden, damit nur die Fokuspunkte an der Hand erzeugt werden. So teilt die Leistung nur auf die aktuell relevanten Punkte, die dann stärker fühlbar sind. Abbildung 8.3 zeigt das angepasste System zur haptischen 3D-Darstellung.

Für die Handtracking-Kamera wurden zwei verschiedene Ansätze betrachtet. Der erste Ansatz benutzt eine handelsübliche Webcam in Kombination mit der Softwarebibliothek *Google Media Pipe*. Diese Softwarebibliothek beinhaltet die Hand Solutions-Bibliothek für die Hand- und Gestenerkennung. Ein trainiertes neuronales Netz erkennt 21 definierte Punkte der Hand, durch welche die x- und y-Position im Bild identifiziert werden können. Die z-Position der Hand wird in Pixeln relativ zur Handgelenkposition bestimmt. Bei der Tiefeninformation handelt es sich nicht um ein echtes Tiefenbild, sondern nur um eine Schätzung.

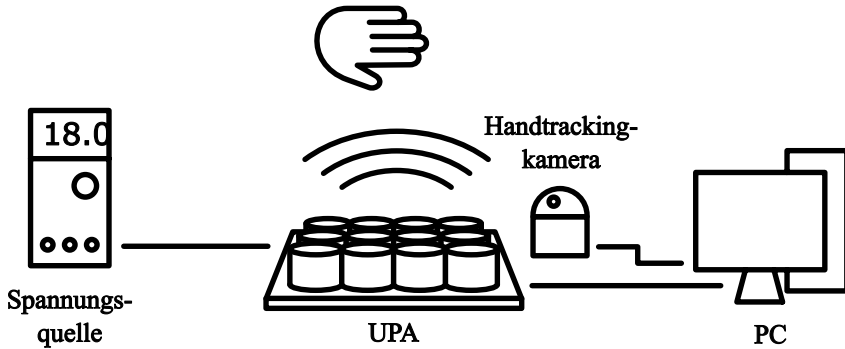


Abbildung 8.3: 3D-Ausgabesystem erweitert um eine Handtracking-Kamera

Der zweite Ansatz ist ein Kamerasystem mit integriertem Handtracking. Das Handtracking erfolgt hier hardwarebasiert durch eine Kombination an Stereo-Infrarotkameras. Hier wurde der *Leap Motion Controller* eingesetzt, der eine Handerkennung in Echtzeit ermöglicht, die durch den Einsatz von Infrarot-Kameras unabhängig von Hintergrund und Lichtverhältnissen funktioniert. Die Tiefeninformationen werden anders als bei der *Google Media Pipe* nicht geschätzt, sondern auf Basis der Stereo-Kameras berechnet. So wird die präzise Entfernung der Hand zur Kamera bestimmt.

Aufgrund der Vorteile einer präzisen Tiefeninformation zur Bestimmung der Entfernung zwischen Hand und UPA wurde der zweite Ansatz gewählt, um das UPA-System zu erweitern.

Für die Integration der Handtracking-Kamera in das 3D-Ausgabesystem wurde ein speziell angepasstes Gehäuse entworfen und mittels 3D-Druck realisiert. Ziel war es, eine reproduzierbare und stabile Positionierung der Kamera in Relation zum UPA sicherzustellen. Durch die feste Montage der Kamera wird eine verlässliche Erfassung der Handposition über dem UPA ermöglicht, da die relative Position zwischen Kamera und zu beobachtender Fläche konstant bleibt.

Abbildung 8.4 veranschaulicht das im CAD-System entworfene Gehäuse, während Abbildung 8.5 das fertig montierte UPA und die Handtracking-Kamera innerhalb des 3D-gedruckten Gehäuses zeigt.

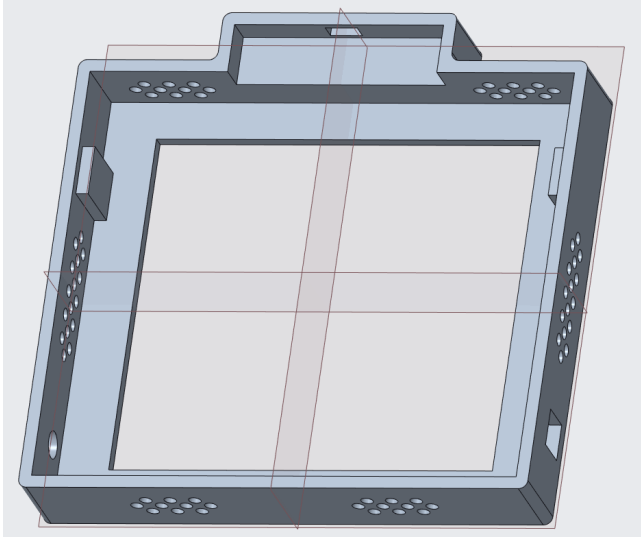


Abbildung 8.4: Design des UPA-Gehäuses mit Kamerahalterung

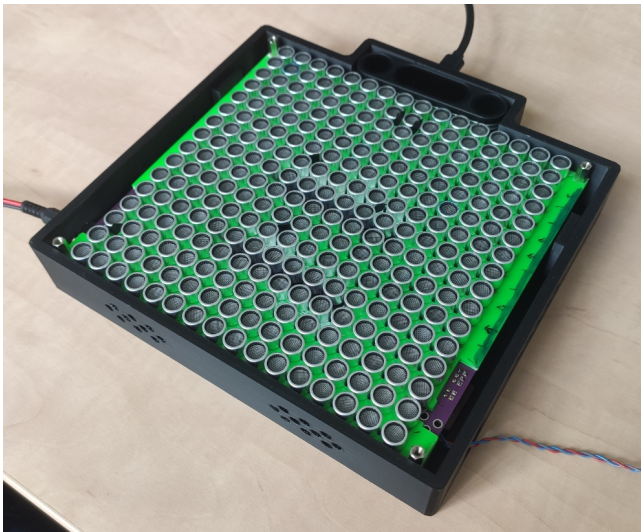


Abbildung 8.5: UPA mit Handtracking-Kamera im Gehäuse

8.3 Software zur Ansteuerung des Ultraschall-Phased-Arrays

Die von Upnalab bereitgestellte Software ermöglicht die manuelle Konfiguration einfacher 2D- und 3D-Projektionen. Diese Funktionalität ist jedoch nicht ausreichend, um komplexe Oberflächenstrukturen, wie betroffene Hautareale bei Psoriasispatient*innen darzustellen. Daher wurde eine eigene Software zur Ansteuerung des UPAs entwickelt³. Ein zentrales Ziel der Softwareentwicklung bestand darin, die im Rahmen der 3D-Modellierung generierten Modelldaten zu verarbeiten und für die Ultraschallprojektion nutzbar zu machen. Zu diesem Zweck wurden die zentralen Funktionen der bestehenden Open-Source-Software übernommen und an die spezifischen Anforderungen des Anwendungsfalls angepasst.

Einzelne Komponenten der Software, wie die Array-Ansteuerung sowie die Phasenberechnung konnten in die neue Software integriert werden. Allerdings bestehen bei Upnalab deutliche Einschränkungen hinsichtlich der Integration externer Modelle. Insbesondere die ausschließliche Unterstützung des proprietären .ani-Dateiformats stellt ein Hindernis dar, da dieses nicht mit den erzeugten 3D-Modellen der Hautareale kompatibel ist. Diese Einschränkung soll in der neuen Software behoben werden, indem die Möglichkeit zur Darstellung von .ply-Dateien ermöglicht wird.

8.3.1 Konzeptionierung der Software-Architektur

Die Software-Architektur soll sich in vier funktional voneinander getrennte Komponenten gliedern: die grafische Bedienoberfläche, die Logikeinheit, das Kommunikationsinterface sowie das Handtracking-Modul. Dieser modulare Aufbau soll eine unabhängige Entwicklung, Testung und Wartung der Softwarekomponenten ermöglichen, sowie eine spätere Erweiterung der Architektur um weitere Komponenten erleichtern.

³ Einzelne der folgenden Abschnitte enthalten inhaltliche Zuarbeiten, die im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit [TH4] entstanden sind.

Die **grafische Bedienoberfläche** dient als Schnittstelle zwischen System und Nutzer*in. Über sie sollen die Parameter konfiguriert, 3D-Modelle importiert und für die Anzeige ausgewählt sowie das haptische Feedback gestartet und beendet werden. Außerdem soll sie den Systemzustand zu jeder Zeit visualisieren.

Die **Logikeinheit** soll die anwendungsspezifischen Algorithmen implementieren. Dazu gehören die Verarbeitung der 3D-Punktdaten der geladenen Modelle und die Erzeugung der entsprechenden Phaseninformationen zur Erzeugung der Fokuspunkte für das UPA. Zusätzlich müssen die Sensordaten des Handtracking-Moduls zur Berechnung der Handposition relativ zum UPA verarbeitet und daraus dynamisch die aktuell benötigten Fokuspunkte bestimmt werden.

Das **Kommunikationsinterface** soll die Verbindung zur Hardware herstellen. Die Verbindung soll seriell über eine UART-Schnittstelle erfolgen. Die Schnittstelle abstrahiert die Kommunikationslogik durch ein definiertes Kommunikationsprotokoll.

Das **Handtracking-Modul** soll die räumliche Position der Hand mittels der externen Sensoreinheit erfassen. Diese erfassten Sensordaten müssen kontinuierlich aktualisiert und der Logikeinheit zur Verfügung gestellt werden. Sie bilden die Grundlage für die dynamische Generierung der Ultraschall-Fokuspunkte.

8.3.2 Implementierung der Software

Für die Umsetzung der Software wurden verschiedene Sprachen hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Zu den Bewertungskriterien zählten insbesondere die Prototyping-Fähigkeit, die Möglichkeit zu grafischen und 3D-Visualisierung, die Performanz, Verfügbarkeit von Bibliotheken und die Möglichkeit zur Integration in das geplante Gesamtsystem. Betrachtet wurden die Programmiersprachen Python, MATLAB, Java, C++ und JavaScript. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.2 dargestellt.

Auf Basis der Ergebnisse wurde Python ausgewählt. Gerade in frühen Entwicklungsphasen ist es wichtig, Ideen schnell umsetzen und testen zu können. Python

ermöglicht dies durch eine einfache Syntax und breite Tool-Unterstützung. Für die relevanten Bereiche GUI-Entwicklung, 3D-Visualisierung und Kommunikation bietet Python stabile und gut dokumentierte Bibliotheken. Außerdem existieren durch die breite Nutzung viele Lösungen, Best Practices und Dokumentationen. Dem Nachteil der Ausführungsperformanz lässt sich durch eine Kombination mit C/C++ für performanzkritische Teile entgegenwirken.

Tabelle 8.2: Vergleich ausgewählter Programmiersprachen hinsichtlich ihrer Eignung für die geplante Anwendung, basierend auf [134–137]

Sprache	Vorteile	Nachteile
Python ¹	• Hohe Flexibilität • Schnelle Prototypenentwicklung • Viele etablierte Bibliotheken	• Geringe Ausführungsperformanz bei komplexer Logik
MATLAB ²	• Effiziente numerische Berechnungen • Integrierte 2D-Visualisierung • Schnelles Prototyping	• Eingeschränkte 3D-Fähigkeiten • Nicht frei verfügbar
Java ³	• Objektorientierte Struktur • Plattformunabhängig • Serielle Kommunikation möglich	• Eingeschränkte native 3D-Grafikunterstützung • Mittlere Performanz
C++ ⁴	• Sehr hohe Ausführungsperformanz • Umfangreiche 3D-Bibliotheken • Hardwarenahe Entwicklung	• Hoher Entwicklungsaufwand • Komplexes Debugging
JavaScript ⁵	• Plattformunabhängig im Web • Einfache GUI-Einbindung • Viele Visualisierungsframeworks (z. B. three.js)	• Eingeschränkte Systemintegration • Geringe Performanz bei rechenintensiven Aufgaben

¹ <https://www.python.org/>

² <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

³ <https://www.java.com/de/>

⁴ <https://cplusplus.com/>

⁵ <https://developer.mozilla.org/de/docs/Web/JavaScript>

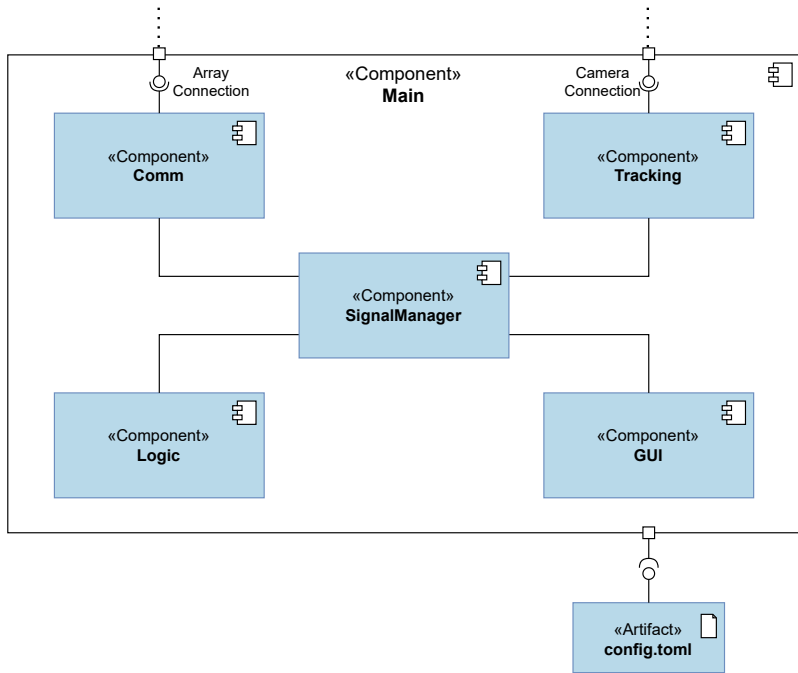


Abbildung 8.6: Komponentendiagramm der Software

8.3.2.1 Realisierung der Software-Komponenten

Abbildung 8.6 zeigt das Komponentendiagramm der implementierten Software. Das Zentrum der Anwendung bildet die Komponente **Main**. Sie verbindet alle anderen Module miteinander und initialisiert die Anwendung. Beim Start wird die *config.toml*-Datei ausgelesen. Sie enthält alle für den Systemstart benötigten Parameter. Es wird ein `QApplication` erstellt und die GUI im Hauptthread gestartet. Die Komponenten **Comm**, **Logic** und **Tracking** werden in jeweils eigenen `QThreads` gestartet. So wird sichergestellt, dass sie unabhängig vom Hauptfenster laufen. Zusätzlich wird eine Shutdown-Routine für das saubere Beenden des Programms definiert. Dann öffnet sich das Hauptfenster mit den Visualisierungselementen.

Der **SignalManager** ist die zentrale Steuerungseinheit innerhalb der Software, er steuert, verarbeitet und koordiniert die Signale zwischen den Threads. Für die Kommunikation wird die Funktion `wait_for_signal()` genutzt. Sie pausiert die Anwendung an bestimmten Stellen bis entweder ein definiertes Signal empfangen wurde oder eine festgelegte Wartezeit abgelaufen ist. Dafür wird eine lokale Ereignisschleife `QEventLoop` genutzt. Die Schleife hält das Programm kurzzeitig an und verarbeitet nur noch die Signale, bis das definierte Signal eintrifft. Durch das gezielte Warten wird der korrekte Ablauf sichergestellt und die Synchronisation erleichtert, ohne dass die GUI einfriert.

Der **GUI-Thread** ist der Hauptthread der Anwendung und verwaltet das Main Window, das alle Bedienelemente, Menüs, Buttons usw. enthält, über die die Benutzenden mit dem System interagieren. Die grafische Oberfläche wird mit `QTDesigner` erstellt und mit dem Tool `pyside6-uis` in Python-Code übersetzt. Aus dem `MainWindow` kann ein zusätzliches `DebugWindow` aufgerufen werden, das alle Debugnachrichten der verschiedenen Komponenten darstellt.

Der **Logic-Thread** berechnet die nötige Phasenverschiebung für jeden einzelnen Ultraschallwandler, damit sie gemeinsam den benötigten Fokuspunkt erzeugen. Er besteht aus zwei Bestandteilen. Der `LogikWorker` nimmt Anfragen der GUI entgegen und übergibt dann die Position der Ultraschallwandler und die zu erzeugenden Fokuspunkte an den zweiten Baustein `Algorithms`. Dieser enthält die beiden Funktionen `calc_phases()` und `filter_points()`.

`calc_phases()` ist für die Phasenberechnung zuständig. Sie bestimmt, wie stark die einzelnen Ultraschallwandler ihre Wellen verzögern müssen, damit sich diese im Fokuspunkt treffen. Als Eingaben erhält die Funktion die Punktmenge der Positionen aller Ultraschallwandler Q , die Position des gewünschten Fokuspunktes P , die Schallgeschwindigkeit c , die Resonanzfrequenz des Ultraschallwandlers f_R und die Phasenauflösung $\Delta\varphi$. Zunächst wird die Zeitverzögerung τ_i basierend auf der Distanz zwischen Ultraschallwandler und Fokuspunkt berechnet. Im Anschluss werden die einzelnen Phasenverschiebungen φ_i , bezogen auf die Frequenz f_R , im Bogenmaß berechnet.

$$\varphi_i = (\tau_i \cdot 2\pi f_R) \bmod 2\pi \quad (8.3)$$

Die berechneten kontinuierlichen Phasenverschiebungen werden im Anschluss unter Berücksichtigung der Phasenauflösung $\Delta\varphi$ in diskrete Werte überführt. Diese Vorgehensweise weicht von der in Kapitel 3.2 beschriebenen Berechnungsmethode ab und ist auf die Implementierung des verwendeten seriellen Protokolls zurückzuführen. Anstelle der Übertragung der Taktverzögerung δ_{mn} wird ein ganzzahliger Phasenwert gesendet, der die Anzahl der Verschiebungsschritte der Phase um $\Delta\varphi$ angibt. Die ganzzahligen Phasenwerte werden dann an das UPA gesendet, wo das FPGA basierend darauf die eigentliche Zeitverzögerung berechnet. Abbildung 8.7 veranschaulicht den Ablauf innerhalb der Funktion.

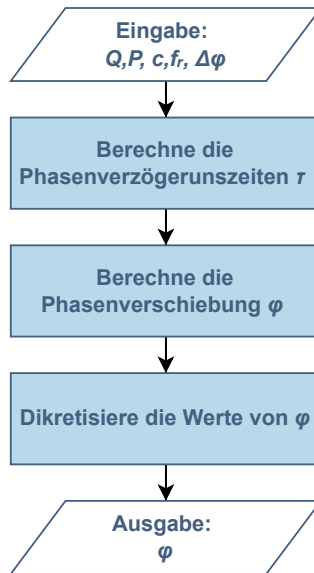


Abbildung 8.7: Flussdiagramm der Funktion `calc_phases()`.

Die zweite Funktion `filter_points()` bestimmt die Teilmenge aller Punkte des 3D-Modells, die für das haptische Feedback relevant sind, weil sie in der Nähe des Handinnenflächenmittelpunkts s_c liegen. Dazu wird der Normalenvektor $\vec{n}$ verwendet, der orthogonal zur Handfläche steht. Die Filterung erfolgt innerhalb einer Halbkugel mit dem Radius R entlang der Richtung von $\vec{n}$, sodass alle erreichbaren Fokuspunkte unterhalb der Handfläche selektiert werden. Abbildung 8.8 zeigt die Funktionsweise der Filterung. Der Handmittelpunkt s_c ist als blauer Punkt markiert, von dem die Normale $\vec{n}$ senkrecht zur Hautoberfläche verläuft. Aus der Punktmenge S werden zunächst alle Punkte innerhalb des Suchradius R um s_c bestimmt und anschließend auf jene innerhalb der durch n definierten positiven Hemisphäre eingeschränkt. Die selektierten Fokuspunkte sind rot, die verworfenen grau dargestellt.

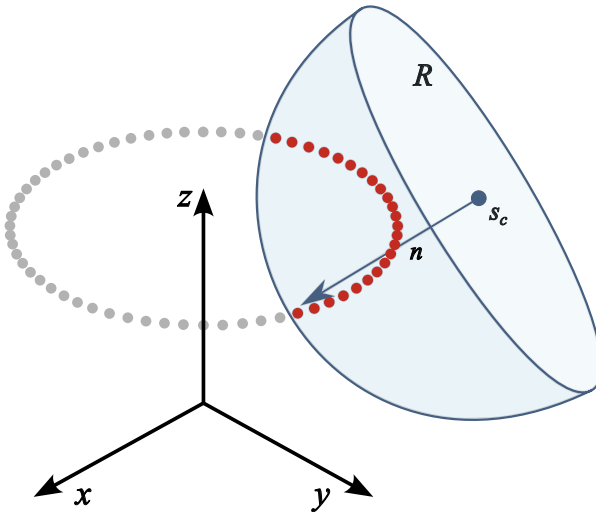


Abbildung 8.8: Veranschaulichung der Filterung der Fokuspunkte durch `filter_points()`.

Der **Tracking**-Thread ist für das Handtracking zuständig und besteht aus mehreren Klassen. Die Klasse `TrackingWorker` steuert das Handtracking innerhalb der Anwendung. Sie verwaltet außerdem die Klasse `LeapMotionTracker`, die über eine direkte Verbindung mit der Leap-Motion-Hardware kontinuierlich die

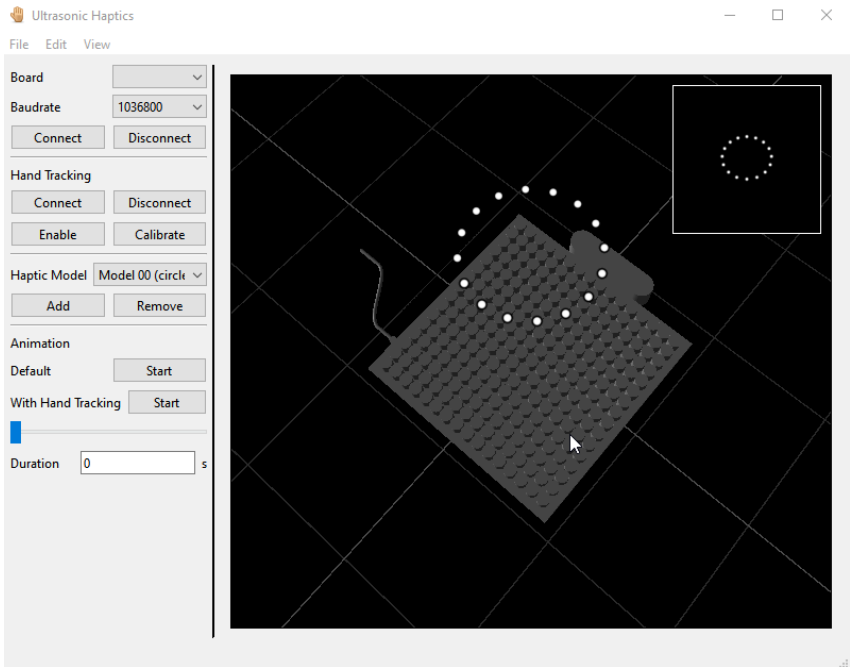


Abbildung 8.9: Hauptfenster des entwickelten Programms Ultrasonic Haptics

Handposen erfasst. Die Handpositionen werden mithilfe eines Timers regelmäßig abgefragt und die ermittelten Koordinaten an den **Logic**-Thread weitergeleitet.

8.3.2.2 Softwarefunktionalitäten der Bedienoberfläche

Abbildung 8.9 zeigt die Bedienoberfläche des entwickelten Programms **Ultrasonic Haptics**. Die Oberfläche gliedert sich in zwei Bereiche. Auf der linken Seite befindet sich das Steuerungspanel und auf der rechten Seite die 3D-Visualisierung. Das Steuerungspanel gliedert sich wiederum in verschiedene Funktionsbereiche. Im obersten Bereich können die Parameter zur Verbindung des PCs mit dem UPA verändert werden. Der serielle COM-Port kann ausgewählt werden, durch den das

UPA mit dem PC verbunden ist. Außerdem besteht die Option die Baudrate einzustellen. Beide Parameter werden über ein Dropdown-Menü eingestellt, das alle verfügbaren Optionen auflistet. Die Verbindung zum UPA wird über die beiden Buttons *Connect* und *Disconnect* hergestellt und getrennt.

Im nächsten Funktionsbereich **Handtracking** stehen vier Buttons zur Verfügung, über die das Handtracking-Modul gesteuert wird. Mit den beiden Buttons *Connect* und *Disconnect* wird die Verbindung zur Handtracking-Kamera hergestellt und aufgelöst. Bei dem *Enable*-Button handelt es sich um einen Umschalt-Button, der nach dem Aktivieren *Disable* anzeigt und so durch Betätigen des Buttons abwechselnd das Handtracking aktiviert und deaktiviert. Der Button *Calibrate* startet die Kalibrierung der Handposition relativ zum Zentrum des UPAs. Nach Betätigung des Buttons erscheint ein Dialogfeld mit der Anweisung, die Hand mittig über dem UPA zu positionieren. Die Handposition wird für drei Sekunden ermittelt und der Mittelwert der Position gespeichert.

Im Funktionsbereich **Haptic Model** wird das anzuzeigende 3D-Modell ausgewählt. Über den Button *Add* können neue 3D-Modelle hinzugefügt werden. Es öffnet sich ein Dialogfenster, um eine entsprechende 3D-Datei aus dem Systempfad auszuwählen. Über ein Dropdown-Menü können die geladenen Modelle ausgewählt werden, um sie in der 3D-Visualisierung anzuzeigen. In Abbildung 8.9 ist beispielsweise das Modell „Model 00 (circle.ply)“ ausgewählt, das in der 3D-Visualisierung als Punktwolke zu sehen ist. Über den Button *Remove* ist es möglich, geladene 3D-Modelle wieder zu entfernen. Über den Menü-Reiter *File* können ebenfalls 3D-Modelle geladen und verwaltet werden. Zusätzlich können sämtliche im Steuerungspanel vorgenommenen Einstellungen gespeichert und wieder zurückgesetzt werden (vgl. Abbildung 8.10).

Der unterste Funktionsbereich **Animation** steuert die Generierung des haptischen Feedbacks. Der *Start*-Button bei *Default* startet das haptische Feedback im Standard-Modus. Hier werden alle im Modell vorhandenen Punkte als Fokuspunkte dargestellt. Über den *Start*-Button bei *With Hand Tracking* startet das haptische Feedback im Handtracking-Modus. Hier werden dynamisch nur die Punkte des 3D-Modells als Fokuspunkte erzeugt, die sich an der durch das Handtracking bestimmten Position der Handfläche liegen. Die Dauer der Animation kann entweder über den Schieberegler oder über das Freitextfeld *Duration* eingestellt werden.

Eine Statusleiste am unteren linken Rand gibt Informationen über den aktuellen Systemzustand. In der Abbildung ist die Status-Meldung *Connected the hand tracking camera* zu sehen, die angibt, dass die Handtracking-Kamera erfolgreich verbunden wurde.

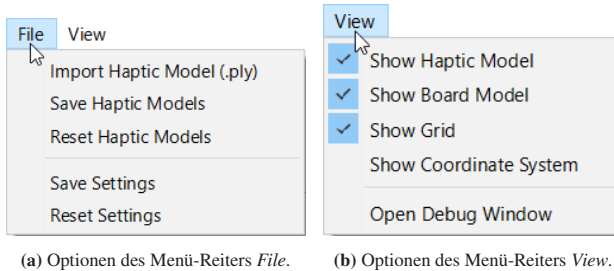


Abbildung 8.10: Menü-Reiter der Bedienoberfläche

Auf der rechten Seite ist die 3D-Visualisierung zu sehen. Mittig ist das genutzte UPA dargestellt. Über dem UPA werden nach dem erfolgreichen Laden eines 3D-Modells die darzustellenden Fokuspunkte des Modells angezeigt. Die angezeigten Elemente können über den Menü-Reiter *View* angepasst werden (vgl. Abbildung 8.10). Die Anzeige kann mit der Maus gesteuert werden. Über das Mousrad wird die Anzeige skaliert. Durch Ziehen der Maus wird die Anzeige rotiert, durch Ziehen der Maus bei gleichzeitig gedrückter Shift-Taste wird die Anzeige verschoben. Das angezeigte 3D-Modell kann zusätzlich über den Menü-Reiter *Edit* angepasst werden. Es öffnet sich ein neues Fenster *Edit Snippet* (vgl. Abbildung 8.11) in dem ein Ausschnitt des Modells ausgewählt werden kann, der fühlbar sein soll. Ist eine Auswahl erfolgt, wird diese in der 3D-Visualisierung angezeigt, während am linken oberen Rand weiterhin in einem Kasten das gesamte 3D-Modell zu sehen ist.

Abbildung 8.12 zeigt die 3D-Visualisierung einmal mit dem Standard-Feedback und daneben mit dem Handtracking-Feedback.

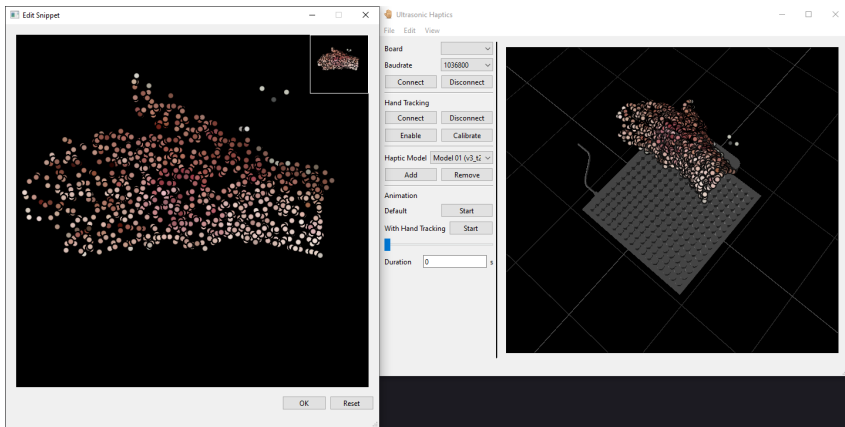


Abbildung 8.11: Ultrasonic Haptics-Anwendung mit ausgewähltem Hautmodell

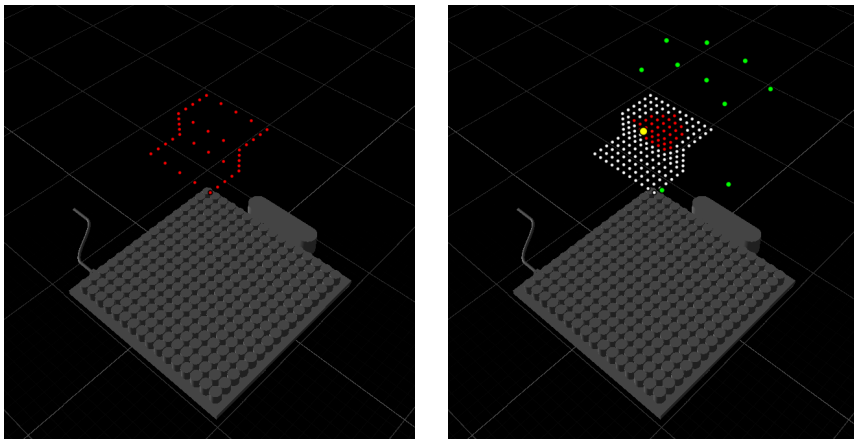


Abbildung 8.12: 3D-Visualisierung mit Standard-Feedback (links) und Handtracking-Feedback (rechts)

8.4 Integration in das Gesamtsystem



Abbildung 8.13: Auswahl des 3D-Modells in der Patient*innen-Ansicht

Die Software zur Ansteuerung des UPAs wurde vollständig in das entwickelte Gesamtsystem integriert, sodass sie über das Dermatolog*innen-Dashboard gestartet werden kann. Der Ablauf zur Nutzung ist dabei wie folgt strukturiert: Zunächst wählen die behandelnden Dermatolog*innen im Dashboard auf der Seite der jeweiligen Patientin bzw. des jeweiligen Patienten das gewünschte 3D-Hautmodell aus (vgl. Abbildung 8.13). Nachdem das passende Modell ausgewählt wurde, kann durch Betätigung des Buttons *Fühlen* der haptische Ausgabemodus gestartet werden. Im Hintergrund wird dadurch automatisch die Ultrasonic Haptics-Anwendung geöffnet. Ohne weiteren manuellen Zwischenschritt lädt die Anwendung das zuvor im Dashboard gewählte 3D-Modell und bereitet es für die haptische Darstellung vor. Ist das UPA korrekt über mit dem PC verbunden, wird durch das Starten der Animation in der Anwendung das UPA gestartet und das Hautmodell kann nun für eine Diagnose haptisch untersucht werden.

9 Evaluierung

Gemäß dem Ansatz der iterativen Entwicklung wurden die einzelnen Komponenten im Entwicklungsprozess regelmäßig mit den Nutzendengruppen evaluiert, um eine möglichst hohe Nutzbarkeit zu erreichen. Nachfolgend werden die wichtigsten Tests und Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Abschließend wird das entwickelte System hinsichtlich der erhobenen Anforderungen evaluiert.

9.1 Evaluierung der 3D-Modellierung

Die Evaluierung der 3D-Modelle teilt sich in eine quantitative Bewertung anhand von Ähnlichkeits- und Performancemetriken und eine qualitative Bewertung durch Dermatolog*innen, welche die Eignung und Nutzbarkeit der Modelle in der Teledermatologie bewerteten.

Abbildung 9.1 zeigt die Ergebnisse der drei genutzten 3D-Modellierungs-Verfahren beispielhaft für vier verschiedene Hautstellen. Es ist jeweils ein Bildausschnitt aus dem Originalvideo sowie ein Bild aus den entstandenen 3D-Modellen der drei Verfahren abgebildet. Für eine Vergleichbarkeit wurde für alle Bilder der gleiche Blickwinkel gewählt.

9.1.1 Quantitative Bewertung der generierten 3D-Modelle

Für eine objektive Bewertung der Eignung der Modelle für den Einsatzbereich der dermatologischen Diagnostik wurden verschiedene Metriken herangezogen,

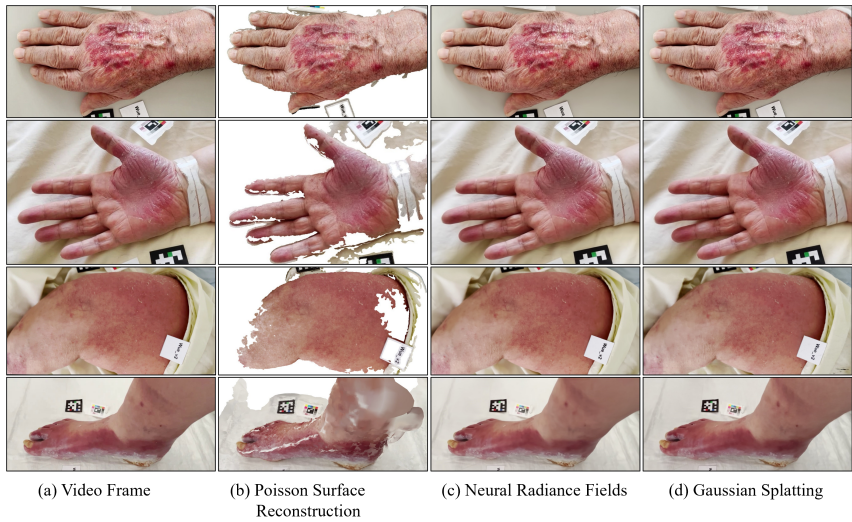


Abbildung 9.1: Ergebnisse der Verfahren zur 3D-Modellierung

welche die Übereinstimmung zwischen den 3D-Modellen und den zugrundeliegenden 2D-Bildern abbilden. Zur Bewertung der Modellierungsqualität der jeweiligen Verfahren wurden die Metriken PSNR, SSIM und L-PIPS (vgl. Kapitel 3.1.1.6) erhoben. Neben der Ähnlichkeitsanalyse wurde auch eine Bewertung der Performanz durchgeführt. Dazu wurden die Dauer, die das Verfahren zur Modellerstellung benötigt und die Größe des entstandenen 3D-Modells erhoben. Tabelle 9.1 zeigt die Durchschnittswerte für alle erstellten 3D-Modelle, geordnet nach den drei genutzten Verfahren.

Tabelle 9.1: Vergleich der Ähnlichkeits- und Performanzwerte der verschiedenen Verfahren

Verfahren	Dauer (min:sec)	Größe (MB)	PSNR (dB)	SSIM (0-1)	L-PIPS (1-0)
PSR	37:28	37,4	12,79	0,67	0,48
NeRF	13:03	167,0	26,27	0,89	0,10
Gaussian Splatting	12:19	50,9	33,51	0,98	0,07

Der Vergleich der PSNR-, SSIM- und L-PIPS-Werte zeigt, dass PSR deutlich schlechtere Werte als die beiden anderen Verfahren liefert. Der durchschnittliche PSNR-Wert liegt mit 12,79 dB deutlich unter dem Idealbereich von 30 bis 50 dB. Auch der SSIM-Wert und der L-PIPS-Wert liegen mit durchschnittlich 0,67 und 0,48 deutlich entfernt von den jeweiligen Idealwerten 1 und 0. Bei der Performanzanalyse liefert PSR gemischte Ergebnisse. Das Verfahren benötigt mit im Durchschnitt 37 Minuten und 28 Sekunden am längsten von allen drei Verfahren für die Modellierung, im Gegensatz dazu benötigt es aber auch den geringsten Speicherplatz für die 3D-Modelle.

Während die Ergebnisse des NeRF-Verfahrens für das menschliche Auge kaum Unterschiede zwischen Original-Bild und 3D-Modell-Ausschnitt erkennen lassen, zeigt die objektive Analyse leichte Abweichungen in der Modellierungsqualität. Der PSNR-Mittelwert von 26,27 dB liegt unterhalb des Idealbereichs. Mit einem Durchschnittswert von 0,89 liegt der SSIM-Wert nur leicht unter dem Idealwert von 1. Auch L-PIPS erreicht einen durchschnittlichen Wert von 0,1, nahe am Idealwert von 0. Mit durchschnittlich 13:03 Minuten Modellierungsdauer ist das Verfahren mehr als doppelt so schnell wie PSR. Ein Nachteil ist der hohe Speicherplatzbedarf mit durchschnittlich 167 MB.

Gaussian Splatting bietet die beste Performance. Mit einer schnellen Modellierungsdauer von durchschnittlich 12:19 Minuten und einer geringen Größe von 50,9 MB liefert es die Modelle mit der höchsten Modellierungsqualität. Der PSNR-Wert liegt mit durchschnittlich 33,51 dB im Idealbereich. Auch die Durchschnittswerte von 0,98 für SSIM und 0,07 für L-PIPS sind nahezu ideal.

Die quantitative Evaluierung zeigt, dass Gaussian Splatting objektiv die besten Ergebnisse hinsichtlich der 3D-Modellierung liefert und alle Anforderungen (M.1 bis M.3) erfüllen kann, weshalb dieses Verfahren in den 3D-Modellierungsprozess des Systems integriert wurde.

9.1.2 Qualitative Bewertung: Eignung für die Teledermatologie

Neben der quantitativen Analyse der 3D-Modelle wurde auch die Eignung der 3D-Modelle und der umgesetzten visuellen 3D-Darstellung für die Teledermatologie mit Dermatolog*innen evaluiert. An der Evaluierung nahmen 16 Dermatolog*innen des UKW teil. Ihnen wurden zunächst klassische 2D-Fotos der vier Psoriasis-Stellen, die in Abbildung 9.1 dargestellt sind, zur Einschätzung des Hautzustandes zur Verfügung gestellt. Anschließend erhielten sie Zugriff auf die visuelle 3D-Darstellung und konnten zu jeder Hautstelle das entsprechende 3D-Modell untersuchen und erneut eine Einschätzung des Hautzustandes abgeben. Da die 3D-Modelle des Gaussian Splatting-Verfahrens in der quantitativen Analyse die besten Ergebnisse erzielten, wurden die 3D-Modelle dieses Verfahrens für die Evaluierung genutzt.

Im Anschluss an die Untersuchungen der Fotos und 3D-Modelle mussten alle Teilnehmenden einen Fragebogen (siehe Anhang A.1.4) zur Bewertung der diagnostischen Eignung der 3D-Modelle ausfüllen. Im Fragebogen konnten die Dermatolog*innen für verschiedene Aspekte der Diagnose auswählen, ob sie 3D-Modelle oder 2D-Fotos bevorzugen würden. Außerdem waren verschiedene Eigenschaften der 3D-Modelle und deren Eignung für den Use-Case auf einer 5-stufigen Likert-Skala zu bewerten, wobei 1 der schlechteste Wert mit *sehr schlecht* und 5 der beste Wert mit *sehr gut* war.

Im Abschnitt *Visuelle Bewertung* bewerteten die Dermatolog*innen verschiedene Merkmale der 3D-Modelle:

1. Erkennbarkeit der Hautveränderungen (Rötung, Schuppung etc.) (L1)
2. Detailgenauigkeit der Hautstruktur (L2)
3. Erkennung von Übergängen zwischen gesunder und betroffener Haut (L3)
4. Möglichkeit zur Betrachtung von verschiedenen Perspektiven (L4)
5. Einschätzung der Plaque-Erhöhung (L5)

Abbildung 9.2 zeigt die Verteilung der Bewertungen dieser Merkmale und Tabelle 9.2 beinhaltet Mittelwert, Standardabweichung und Varianz der Bewertungen.

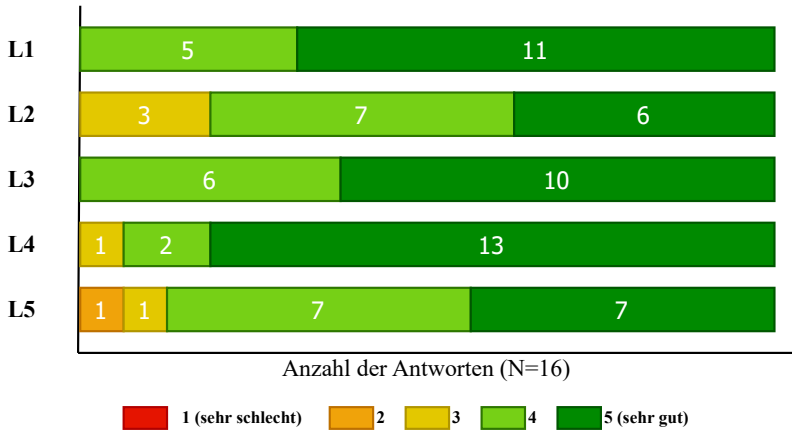


Abbildung 9.2: Bewertung der Merkmale der 3D-Modelle

Alle Merkmale erzielten hohe Mittelwerte (zwischen $\mu = 4,19$ und $\mu = 4,75$) und zeigen eine hohe Akzeptanz für die 3D-Modelle allgemein. Die Detailgenauigkeit der Hautstruktur (L2) und die Einschätzung der Plaque-Erhöhung (L5) wiesen mit einem Mittelwert von 4,19 und 4,25 zwar sehr gute, aber im Vergleich zu den anderen Parametern die schlechtesten Ergebnisse und die größte Streuung auf. Dies deutet darauf hin, dass die rein visuelle Einschätzung der Höhe ohne messbare Referenzwerte auch im 3D-Modell subjektiven Schwankungen unterliegen kann, wenngleich sie dem 2D-Foto überlegen bleibt. Die Möglichkeit, die Läsion aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten (L4), erhielt mit einem Mittelwert von 4,75 die höchste Bewertung innerhalb der visuellen Kategorien. Dies bestätigt, dass die statische Natur von 2D-Fotos eine Limitation darstellt, die durch interaktive 3D-Modelle überwunden wird.

In den qualitativen Rückmeldungen nannten die Dermatolog*innen spezifische Merkmale wie Dicke, Volumen, Erhabenheit und Plaque-Höhe als entscheidende

Vorteile, die im 3D-Modell – anders als im 2D-Foto – erkennbar sind. Dies korreliert mit der quantitativen Bewertung der Erkennbarkeit der Hautveränderung (L1) mit einem Mittelwert $\mu = 4,69$ und der Erkennung von Übergängen (L3) mit dem Mittelwert $\mu = 4,63$.

Tabelle 9.2: Statistische Kennwerte zur Bewertung der 3D-Modell-Merkmale

Kategorie	Mittelwert	Standardabw.	Varianz
Erkennbarkeit der Hautveränderung (L1)	4,69	0,48	0,23
Detailgenauigkeit der Hautstruktur (L2)	4,19	0,75	0,56
Erkennbarkeit von Übergängen (L3)	4,63	0,50	0,25
Betrachtung verschiedener Perspektiven (L4)	4,75	0,58	0,33
Einschätzung Plaque-Erhöhung (L5)	4,25	0,86	0,73

Ein weiterer Abschnitt des Fragebogens behandelte die *Beurteilung der klinischen Nützlichkeit*. Die Ergebnisse der Fragen mit Likert-Skala sind in Abbildung 9.3 und Tabelle 9.3 dargestellt.

„Wie gut helfen Ihnen die 3D-Modelle im Vergleich zu den 2D-Fotos bei der Diagnose von Psoriasis“ (L6) wurde mit $\mu = 4,38$ bewertet. Besonders signifikant ist, dass 100 % der Dermatolog*innen angaben, den Schweregrad der Erkrankung mittels 3D-Modell präziser beurteilen zu können. Die Ergebnisse bestätigen noch einmal die Eignung der 3D-Modelle für die Teledermatologie, wobei die Dermatolog*innen die 3D-Modelle mit einem Mittelwert von 4,75 als besonders hilfreich für die Planung einer Fernbehandlung einschätzten (L7).

Tabelle 9.3: Statistische Kennwerte zur Bewertung der Diagnoseeignung der 3D-Modelle

Kategorie	Mittelwert	Standardabweichung	Varianz
Hilfe bei der Diagnose (L6)	4,38	0,62	0,38
Planung Fernbehandlung (L7)	4,75	0,45	0,20

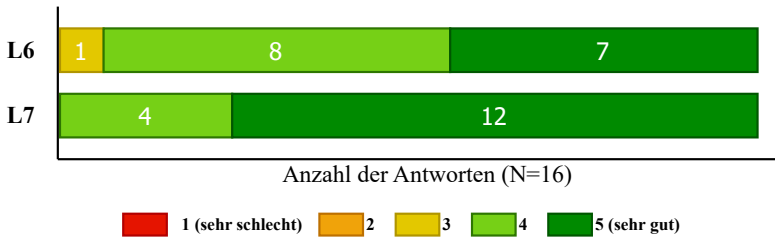


Abbildung 9.3: Bewertung der Diagnoseeignung der 3D-Modelle

Ein einstimmiges Ergebnis zeigte sich auch bei der Frage, ob Aspekte der Behandlung (z. B. Dosierung, Anwendung von Cremes) durch die 3D-Modelle besser angepasst werden können. Die Dermatolog*innen bewerteten zudem in den vier Kategorien:

- klarere Darstellung der Hautveränderungen
- präzisere Beurteilung der Schwere der Hauterkrankung
- bessere Planung von Behandlungen
- generelle Eignung für die Teledermatologie

ob sie die 2D-Fotos oder die 3D-Modelle bevorzugen würden. In jeder Kategorie wählten alle 16 Dermatolog*innen einstimmig die 3D-Modelle, was die eindeutige Präferenz der Dermatolog*innen für die 3D-Modelle als Diagnosemedium und den Mehrwert dieser Darstellungsform für die Teledermatologie deutlich unterstreicht.

9.1.3 Bewertung der Nutzbarkeit

Die Dermatolog*innen füllten in ihrer Bewertung zusätzlich den SUS-Fragebogen aus. Die visuelle 3D-Darstellung erhielt dabei einen SUS-Score von 81,6 (vgl. Abbildung 9.4), was die Anforderung V.4 erfüllt. Wegen sehr begrenzter Zeitressourcen der teilnehmenden Dermatolog*innen konnte bei dieser Evaluierung

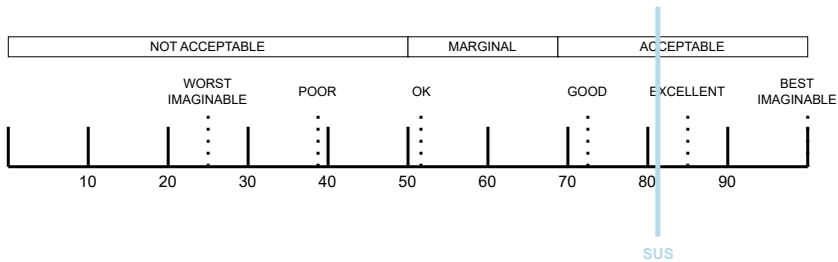


Abbildung 9.4: Ergebnisse der Nutzbarkeitsbewertung der visuellen 3D-Darstellung nach [84]

kein Eingangsfragebogen ausgefüllt werden, um die Hintergründe der Dermatolog*innen zu erheben und so eine Aussage zu Anforderung V.5 treffen zu können.

9.2 Evaluierung der haptischen 3D-Darstellung

Die verschiedenen Entwicklungsstadien der haptischen 3D-Darstellung wurden regelmäßig evaluiert, um die Erfüllung der Anforderungen und die Eignung für die Teledermatologie zu bestimmen. Hierfür wurde ein einheitliches Testkonzept erstellt, um den Fortschritt über die Entwicklungsstadien hinweg objektiv zu messen und zu vergleichen¹. Die Evaluierung gliedert sich in drei Phasen.

9.2.1 Phase I: Evaluierung der Genauigkeit

In Phase I wird die Genauigkeit der haptischen 3D-Darstellung evaluiert. Hierzu werden Tests mit Proband*innen durchgeführt, die verschiedene Aspekte und Details durch eine haptische Analyse der dargestellten 3D-Modelle erkennen müssen. In frühen Entwicklungsstadien des UPAs waren noch keine 3D-Modelle der

¹ Einzelne der folgenden Abschnitte enthalten inhaltliche Zuarbeiten, die im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit [TH5] entstanden sind.

Tabelle 9.4: Ablauf Phase I

Testschritt	Form	Hilfestellung
Testfall I.1: Haptisches Feedback		
I.1-1	Haptisches Feedback	keine
I.1-2	Kein haptisches Feedback	keine
Testfall I.2: 2D-Formen		
I.2-1	Kreis	Form bekannt
I.2-2	Linie	Form bekannt
I.2-3	Kreuz	Wahl zwischen Kreuz und Linie
I.2-4	Dreieck	Wahl zwischen Dreieck und Kreis
I.2-5	Kreis	keine
I.2-6	Quadrat	keine
Testfall I.3: 3D-Formen		
I.3-1	Treppe	Form bekannt
I.3-2	Kugel	Form bekannt
I.3-3	Quader	Wahl zwischen Quader und Kugel
I.3-4	Zylinder	Wahl zwischen Zylinder und Treppe
I.3-5	Treppe	keine
I.3-6	Pyramide	keine
Testfall I.4: Intensitätsstufen		
I.4-1	Intensität 1 (5V)	-
I.4-2	Intensität 2 (10V)	-
I.4-3	Intensität 3 (15V)	-
I.4-4	Intensität 4 (20V)	-

Hautstellen verfügbar. Daher wurden Testschritte mit einfachen 2D- und 3D-Formen entwickelt, die auch unabhängig von den Hautmodellen durchgeführt werden können. Tabelle 9.4 beschreibt den Aufbau aller Testschritte der Phase I. Eine detaillierte Beschreibung des Testaufbaus und eine Darstellung der genutzten 3D-Modelle ist in Anhang A.3 zu finden. Die Testphase I wurde im Entwicklungsprozess insgesamt dreimal mit verschiedenen Entwicklungsständen durchgeführt.

Tabelle 9.5: Testergebnisse der 1. Testrunde: SonicSurface UPA mit OpenSource-Software

Testschritt	Form	Hilfestellung	Dermatolog*innen	Kontrollgruppe
I.1 - 1	haptisches Feedback	keine	100,0 %	100,0 %
I.1 - 2	kein haptisches Feedback	keine	100,0 %	100,0 %
I.2 - 1	Kreis	Form bekannt	66,7 %	100,0 %
I.2 - 2	Linie	Form bekannt	100,0 %	100,0 %
I.2 - 3	Kreuz	Wahl zwischen Kreuz und Linie	88,9 %	88,9 %
I.2 - 4	Dreieck	Wahl zwischen Dreieck und Kreis	66,7 %	88,9 %
I.2 - 5	Kreis	keine	55,6 %	55,6 %
I.2 - 6	Quadrat	keine	11,1 %	0,0 %
I.3 - 1	Treppe	Form bekannt	77,8 %	66,7 %
I.3 - 2	Kugel	Form bekannt	100,0 %	100,0 %
I.3 - 3	Quader	Wahl zwischen Quader und Kugel	44,4 %	33,3 %
I.3 - 4	Zylinder	Wahl zwischen Zylinder und Treppe	22,2 %	100,0 %
I.3 - 5	Treppe	keine	55,6 %	33,3 %
I.3 - 6	Pyramide	keine	33,3 %	55,6 %

9.2.1.1 Testrunde 1

Die erste Testrunde erfolgte mit dem nachgebauten UPA und der dazu bereitgestellten Open-Source-Software des SonicSurface-Projekts, um zu überprüfen, inwieweit dieses UPA bereits den Anforderungen entspricht. An den Tests nahmen 18 Proband*innen teil, davon 9 Dermatolog*innen am UKW und 9 weitere Proband*innen am FZI Forschungszentrum Informatik (FZI) als Kontrollgruppe. Die Ergebnisse der Testfälle I.1 bis I.3 sind in der Tabelle 9.5 zu sehen.

In den Testschritten I.1-1 und I.1-2 erkannten alle Proband*innen eindeutig, ob haptisches Feedback vorhanden war oder nicht. 16 der 18 Proband*innen identifizierten außerdem mindestens drei der sechs 2D-Formen. In den Testschritten mit Unterstützung wurden die Formen im Allgemeinen besser erkannt. Beispielsweise identifizierten 16 der 18 Proband*innen die Form Linie in Testschritt I.2-3

korrekt, während nur eine Testperson das Quadrat in Testschritt I.2-6 korrekt identifizieren konnte. Es zeigte sich, dass insbesondere die Kanten der 2D-Formen schwierig zu ertasten waren.

Die 3D-Formen bereiteten den Proband*innen größere Schwierigkeiten. 12 der 18 Proband*innen konnten mindestens drei der sechs 3D-Formen korrekt identifizieren und 10 Proband*innen konnten auch ohne Hilfestellung mindestens eine der beiden 3D-Formen aus Testschritt I.3-5 und I.3-6 korrekt identifizieren.

Die Proband*innen gaben an, dass die Herausforderungen vor allem die mangelnde Klarheit bzw. Schärfe der Formen, insbesondere der 3D-Formen, war. Insbesondere waren die Kanten und Ecken schwer wahrnehmbar. Die Probleme lassen sich vor allem auf die genutzte Software zurückführen. Diese kann nur Modelle des .ani-Format wiedergeben, welche im Programm von Hand gezeichnet werden müssen, was zu starken Ungenauigkeiten führen kann. Die Testergebnisse zeigen auch, dass 2D-Formen leichter zu identifizieren sind als 3D-Formen. Die Leistung des UPAs teilt sich auf alle Fokuspunkte des angezeigten Modells auf. Da die 3D-Formen aus mehr Fokuspunkten als die 2D-Formen bestehen, sind die Fokuspunkte der 3D-Modelle im Gesamten schwächer wahrzunehmen.

Das UPA kann mit verschiedenen Intensitäten betrieben werden. Die Intensität hängt von der Spannungsstärke ab, die in das UPA gespeist wird. In den Testfällen I.1 bis I.3 wurde die Intensität 4 genutzt. Ziel des Testfalls I.4 war es, zu erheben, bei welcher Intensität die Nutzenden die Formen identifizieren können. In allen Stufen konnten die 2D-Form erkannt werden. Die 3D-Form war für die Proband*innen erst ab Intensitätsstufe 2 (10 V) erkennbar.

9.2.1.2 Testrunde 2

Tabelle 9.6 zeigt die Ergebnisse der zweiten Testrunde, in der die Weiterentwicklung des UPAs evaluiert wurde. Die Tests wurden mit einem UPA durchgeführt, das bereits über eine erhöhte Phasenmodulationsfrequenz verfügte, sowie mit der entwickelten Ultrasonic Haptics-Software angesteuert wurde. Da die entwickelte Software das Anzeigen von Modellen des .ply-Formats unterstützt, konnten für die Tests computergenerierte und geometrisch korrekte Formen genutzt werden.

Tabelle 9.6: Testergebnisse der 2. Testrunde: Erweitertes UPA mit eigener Software (Verbesserungen zu Testrunde I grün hinterlegt)

Testschritt	Form	Hilfestellung	Dermatolog*innen	Kontrollgruppe
I.1 - 1	haptisches Feedback	keine	100,0 %	100,0 %
I.1 - 2	kein haptisches Feedback	keine	100,0 %	100,0 %
I.2 - 1	Kreis	Form bekannt	100,0 %	90,9 %
I.2 - 2	Linie	Form bekannt	100,0 %	100,0 %
I.2 - 3	Kreuz	Wahl zwischen Kreuz und Linie	92,3 %	100,0 %
I.2 - 4	Dreieck	Wahl zwischen Dreieck und Kreis	69,2 %	81,8 %
I.2 - 5	Kreis	keine	61,5 %	72,7 %
I.2 - 6	Quadrat	keine	15,4 %	72,7 %
I.3 - 1	Treppe	Form bekannt	69,2 %	54,6 %
I.3 - 2	Kugel	Form bekannt	92,3 %	72,7 %
I.3 - 3	Quader	Wahl zwischen Quader und Kugel	100,0 %	81,8 %
I.3 - 4	Zylinder	Wahl zwischen Zylinder und Treppe	92,3 %	90,9 %
I.3 - 5	Treppe	keine	61,5 %	63,6 %
I.3 - 6	Pyramide	keine	38,5 %	54,6 %

Dadurch konnten die Formunschärfen aus der ersten Testrunde vermieden werden. An dieser Testrunde nahmen 13 Proband*innen des UKW und 11 weitere Proband*innen am FZI als Kontrollgruppe teil.

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Steigerung der Erkennbarkeit der 2D- und 3D-Formen. Dennoch ist weiterhin deutlich zu erkennen, dass die 3D-Formen eine größere Herausforderung für die Proband*innen darstellten, als die 2D-Formen. Dies lässt sich zum einen darauf zurückführen, dass die 3D-Formen im Allgemeinen komplexer als die 2D-Formen aufgebaut sind. Zum anderen bestehen die 3D-Formen aus mehr Punkten, weshalb die einzelnen Punkte schwächer dargestellt sind (vgl. Kapitel 3.2.4). Hier zeigt sich bereits, dass die aktuelle Leistung des UPAs nicht für die Darstellung der Punktemenge ausreicht, aus der die erstellten 3D-Modelle der Psoriasis-Hautstellen bestehen.

Tabelle 9.7: Testergebnisse der 3. Testrunde: Erweitertes UPA mit Handtracking, Kennzeichnung der Verbesserungen (grün) und Verschlechterungen (rot) zu Testrunde 2

Testschritt	Form	Hilfestellung	Kontrollgruppe
I.1 - 1	haptisches Feedback	keine	72,7 %
I.1 - 2	kein haptisches Feedback	keine	90,9 %
I.2 - 1	Kreis	Form bekannt	72,7 %
I.2 - 2	Linie	Form bekannt	90,9 %
I.2 - 3	Kreuz	Wahl zwischen Kreuz und Linie	81,8 %
I.2 - 4	Dreieck	Wahl zwischen Dreieck und Kreis	90,9 %
I.2 - 5	Kreis	keine	36,4 %
I.2 - 6	Quadrat	keine	45,5 %
I.3 - 1	Treppe	Form bekannt	72,7 %
I.3 - 2	Kugel	Form bekannt	81,8 %
I.3 - 3	Quader	Wahl zwischen Quader und Kugel	72,7 %
I.3 - 4	Zylinder	Wahl zwischen Zylinder und Treppe	81,8 %
I.3 - 5	Treppe	keine	63,6 %
I.3 - 6	Pyramide	keine	36,4 %

Auch in dieser Testrunde wurde Testfall I.4 durchgeführt, um die Intensität des Feedbacks zu testen. Die Ergebnisse decken sich mit denen der Testrunde 1. 20 Teilnehmende konnten sowohl die 2D-, als auch die 3D-Form bei allen Intensitätsstufen erkennen. Vier Teilnehmende erkannten die 3D-Form erst ab Intensitätsstufe 2. Das UPA kann somit mit den drei Intensitätsstufen 10 V, 15 V und 20 V betrieben werden und erfüllt damit die Anforderung H.4.

9.2.1.3 Testrunde 3

In der finalen Testrunde 3 wurde das UPA mit integriertem Handtracking getestet. Es nahmen 11 Proband*innen am FZI als Kontrollgruppe teil. Tabelle 9.7 zeigt die Ergebnisse.

Es zeigt sich, dass der gewünschte Effekt des Handtracking ausbleibt. In einzelnen Testschritten konnte eine leichte Verbesserung erzielt werden, in den meisten Testschritten wurden die Formen allerdings schlechter erkannt.

Die Proband*innen gaben an, dass das Handtracking-Prinzip sehr ungewohnt war und daher bei dem Ertasten der Formen irritierte. Es wurde kritisiert, dass das haptische Feedback aussetzte, sobald die Hand nicht mehr korrekt über dem UPA platziert war und so keine unterbrechungsfreie Analyse möglich war. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde keine Testreihe mit den Dermatolog*innen durchgeführt, da hier keine stark abweichenden Ergebnisse erwartbar waren.

Da bereits die 3D-Modelle der 3D-Formen sowohl mit als auch ohne Handtracking-Modus zu Problemen führten, wurden keine Tests mit 3D-Modellen von Hautstellen durchgeführt. Aus dem Feedback der Proband*innen ging hervor, dass die genutzte Ultraschall-Technologie die Punkte der 3D-Formen nicht klar genug darstellen konnte, um eine eindeutige Identifizierung in allen Fällen zu ermöglichen. Die genutzten 3D-Formen bestehen aus einer Maximalanzahl von 60 Fokuspunkten, die 3D-Modelle der Hautstellen enthalten dagegen eine Anzahl von Fokuspunkten im Bereich 100.000 bis 1.000.000. Eine korrekte Darstellung ist zum aktuellen Entwicklungsstand daher nicht möglich. Die entwickelte haptische 3D-Darstellung ist somit für den Einsatz in der Teledermatologie aktuell noch nicht geeignet.

9.2.2 Phase II: Evaluierung der Nutzbarkeit

Alle Proband*innen mussten vor der Teilnahme an Phase I einen Fragebogen ausfüllen, der verschiedene Hintergründe wie Alter, Beruf und vergangene Handverletzungen abfragt. Dadurch wurde die Anforderung H.8 überprüft und getestet, ob verschiedene Angaben einen Einfluss auf die Performance der Proband*innen in Phase I hatten. Der komplette Fragebogen kann in Anhang A.1.5 eingesehen werden.

Die Auswertung der Testergebnisse und Fragebögen aller Proband*innen konnte keine Einflussfaktoren auf die Performance bei den Aufgaben identifizieren.

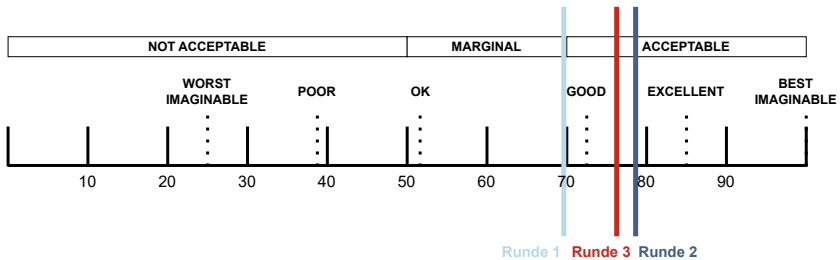


Abbildung 9.5: SUS-Scores der drei Testrunden für die haptische 3D-Darstellung

Es ließ sich allerdings ein gewisser Trainingseffekt erkennen, da die Dermatolog*innen und Proband*innen, die an mehreren Testrunden teilnahmen, im Vergleich zu den Testpersonen, die zum ersten Mal mit dem UPA interagierten, besser abschnitten.

In allen Testrunden wurde außerdem der SUS-Score des jeweiligen Entwicklungsstands erhoben. Abbildung 9.5 zeigt die Ergebnisse. Es ist erkennbar, dass die Nutzbarkeit des erweiterten UPAs mit einem Score von 78,2 deutlich über dem Wert des SonicSurface-Boards mit 69,7 liegt. Allerdings empfanden die Proband*innen das Handtracking mit einem Score von 76,4 als weniger nutzungsfreundlich als das UPA ohne Handtracking. Hier bestätigen sich die Ergebnisse aus der Testphase I, dass die umgesetzte Handtracking-Technologie für den Einsatzzweck aktuell keine Verbesserung bewirken kann.

9.2.3 Phase III: Stress-Tests

In Phase III wurden Stress-Tests durchgeführt, um die Funktionalität des Systems unter verschiedenen Bedingungen zu überprüfen.

In Testfall III.1 wurde ein Funktionstest unter verschiedenen Umgebungstemperaturen durchgeführt. In der ersten Testrunde wurde das UPA innerhalb eines Tages in einem geschlossenen Raum jeweils eine Stunde bei den sechs unterschiedlichen Raumtemperaturen 15 °C, 18 °C, 21 °C, 24 °C, 27 °C und 30 °C betrieben. Es

zeigte sich, dass das UPA ab einer Temperatur von 24 °C nicht mehr voll funktionsfähig war. Die Formen wurden schwächer und die Ecken und Kanten waren deutlich schwieriger zu erkennen. Dieses Problem trat auch bei einem Dauerbetrieb von mehr als einer Stunde ein.

Der Leistungsabfall konnte auf die verbauten MOSFETs zurückgeführt werden, die sich bei längerer Nutzung oder erhöhter Temperatur erwärmten und dann nicht mehr vollständig funktionsfähig waren. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wurde das UPA während der Nutzung auf einem Cooling Pad mit 6 Lüftern platziert.

In der zweiten Testrunde mit Einsatz des Cooling Pads konnten bei verschiedenen Temperaturen keine Einschränkungen in der Funktionalität mehr festgestellt werden.

Auch der Testfall III.2 bei dem das Board 5 Tage jeweils 8 Stunden am Stück genutzt wurde, konnte in der zweiten Testrunde ohne Auffälligkeiten in der Funktionalität durchgeführt werden. Die Funktionalität des UPAs unter verschiedenen Nutzungsbedingungen konnte somit nachgewiesen werden (Anforderungen H.5 und H.6).

9.3 Evaluierung der Nutzbarkeit der Frontends

Auch die entwickelten Frontends wurden auf ihre Nutzbarkeit und die Eignung für den Einsatzzweck der Teledermatologie mit Proband*innen evaluiert. Die Tests umfassten eine kurze Einführung in das System, eine Prä-Test-Befragung zur Erhebung der Hintergründe der Proband*innen, die Aufgabenbearbeitung im Think-Aloud-Modus, sowie eine abschließende Befragung inklusive SUS-Score-Erhebung. Die Fragebögen und Aufgabenstellungen sind in Anhang A.1.6 bis Anhang A.1.9 dargestellt. Die Aufgabenbearbeitung beinhaltete eine Reihe von Aufgaben, welche die definierten Use-Cases mit dem jeweiligen Frontend abbildeten. Die Think-Aloud-Methode fordert die Proband*innen dazu auf, all ihre Gedanken bei der Bearbeitung der Aufgaben ungefiltert zu äußern. Dies ermöglicht einen unmittelbaren Einblick in die Entscheidungsprozesse und Schwierigkeiten

der Nutzenden. So können Abschnitte, die irreführend oder unverständlich sind, leichter identifiziert werden.

9.3.1 Ergebnisse der Evaluierung der Patient*innen-App

An der ersten Testrunde nahmen 10 Proband*innen zwischen 25 und 67 Jahren teil. Bei der Proband*innen-Auswahl wurde auf eine Personengruppe mit verschiedenen beruflichen Hintergründen und technischen Fähigkeiten geachtet, um eine möglichst allgemeine Aussage über die Nutzbarkeit treffen zu können. Eine detailliertere Beschreibung der Proband*innengruppe ist in Anhang A.4.1 zu finden. Die App wurde mit einem SUS-Score von 78,4 bewertet.

Negativ wurde das Auswählen von Hautregionen im Körperdiagramm bewertet, da nicht ersichtlich war, ob das Diagramm gespiegelt oder gewendet angezeigt wird. Auch der Zugriff auf die eigene Profilseite bereitete Schwierigkeiten und wurde nur von 6 der 10 Proband*innen ohne Hilfe erreicht. Ebenso wurde die Anzeige der eigenen Fotos als verwirrend empfunden und der entsprechende Button als schwer auffindbar bewertet.

Die identifizierten Probleme wurden in der nächsten Entwicklungsiteration bearbeitet. So wurde beispielsweise im Körperdiagramm eine Information über die angezeigte Ansicht ergänzt und die Navigation komplett auf die Navigationsleiste am unteren Ende der App reduziert.

Die angepasste App wurde in einer zweiten Testrunde mit 10 Proband*innen zwischen 18 und 60 Jahren getestet, von denen 2 bereits an der ersten Befragung teilnahmen und somit einen Input über die Verbesserung geben konnten. Auch hier wurde auf die Diversität der Personengruppe geachtet. Eine detailliertere Beschreibung der Proband*innengruppe ist in Anhang A.4.1 zu finden. Die App wurde mit einem SUS-Score von 86,8 bewertet, was einer exzellenten Nutzbarkeit entspricht (vgl. Abbildung 9.6). Positiv wurde vor allem die einfache Navigation über die Navigationsleiste bewertet. Auch die schnelle Reaktionsgeschwindigkeit der App wurde immer wieder positiv hervorgehoben.

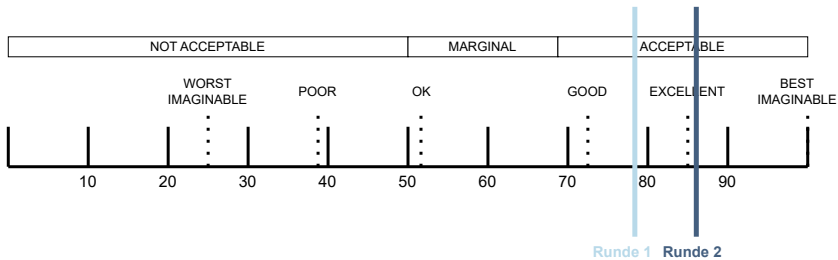


Abbildung 9.6: SUS-Scores der beiden Testrunden für die Patient*innen-App nach [84]

Für eine*n Proband*in bereitete die Ähnlichkeit der Profilsseite und der Seite zur Dokumentation der Hautregionen Probleme. Als Verbesserungsmöglichkeit wurde eine bessere und direkte Erklärung des DLQI-Wertes genannt, sowie die Möglichkeit zum Scrollen auf den entsprechenden Seiten deutlicher hervorzuheben.

Insgesamt hatten die Proband*innen einen positiven Eindruck von der App. Sie wurde als intuitiv und einfach bedienbar beschrieben, auch von den Proband*innen mit geringer technischer Expertise.

9.3.2 Ergebnisse der Evaluierung des Dermatolog*innen-Dashboards

An der Evaluierung des Dashboards nahmen 13 Proband*innen zwischen 18 und 60 Jahren teil, darunter die zehn Proband*innen aus der zweiten Evaluierungsrunde der App sowie drei Dermatologinnen. Eine Beschreibung der Proband*innengruppe ist in Anhang A.4.1 zu finden.

Die Proband*innen bewerteten das Dashboard mit einem SUS-Score von 96,3, was im exzellenten Bereich und nah an der bestmöglichen Nutzbarkeit liegt (vgl. Abbildung 9.7). Besonders die Navigationsleiste wurde positiv bewertet und angegeben, dass sie einen leichten Überblick über alle Bereiche und Funktionen gab. Außerdem wurde die Suchfunktion in der Patient*innen-Übersicht und die Lupen-Funktion in der Foto-Ansicht als sehr praktisch hervorgehoben. Auch die

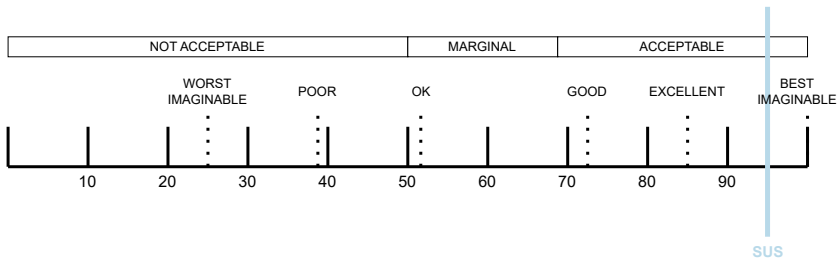


Abbildung 9.7: SUS-Score für das Dermatolog*innen-Dashboard nach [84]

schnelle Ladezeit der Seiten und der einfache Start der externen Anwendungen zur visuellen und haptischen 3D-Darstellung wurden mehrfach positiv erwähnt. Als Verbesserungsvorschlag wurden eine Anzeige der Gesamtzahl der vergangenen Therapien sowie eine automatische Berechnung des Enddatums von Therapien nach Angabe der Therapiedauer genannt.

Der Gesamteindruck des Dashboards war durchweg sehr positiv, die Anwendung wurde als übersichtlich, einfach zu bedienen und klar strukturiert wahrgenommen.

9.4 Erfüllung der Anforderungen

Abschließend wird überprüft, ob das entwickelte System die erhobenen Anforderungen erfüllt.

9.4.1 Patient*innen-App

Die Patient*innen-App erzielte einen SUS-Score von 86,8, der im exzellenten Bereich liegt (A.1) und von einer heterogenen Proband*innen-Gruppe bewertet wurde (A.2). Die App ermöglicht die zeit- und ortsunabhängige Dokumentation des Krankheitsverlaufs (A.3), die jederzeit eingesehen werden kann (A.6). Die Dokumentation beinhaltet die Möglichkeit zur Aufnahme von Fotos (A.5) und

der Angabe der subjektiven Krankheitslast mittels DLQI (A.4). Die App erfüllt damit alle Anforderungen.

Tabelle 9.8: Erfüllungsgrad der Anforderungen an die Patient*innen-App

ID	Bereich	Anforderungen	Status
A.1	Nutzbarkeit	Die App muss in einer Nutzbarkeits-Evaluierung mit mind. 10 Testpersonen eine Nutzbarkeit im guten Bereich erzielen (SUS-Score > 71).	erfüllt
A.2	Nutzbarkeit	Die Nutzbarkeits-Evaluierung muss mit einer Personengruppe erfolgen, die eine heterogene Abdeckung von je drei unterschiedlichen Altersgruppen, technischen Kompetenzniveaus und Berufshintergründen gewährleistet.	erfüllt
A.3	Dokumentation	Die App muss eine zeit- und ortsunabhängige Dokumentation des individuellen Krankheitsverlaufs ermöglichen.	erfüllt
A.4	Dokumentation	Die App muss eine Funktion zur wöchentlichen Erfassung des DLQI bereitstellen, um die subjektive Krankheitslast quantitativ zu dokumentieren.	erfüllt
A.5	Dokumentation	Die App muss eine Funktion zur Aufnahme von Fotos implementieren, die den Nutzenden eine visuelle Verlaufskontrolle ermöglicht.	erfüllt
A.6	Daten-visualisierung	Die App muss den Nutzenden eine Visualisierung des erfassten Krankheitsverlaufs bereitstellen.	erfüllt

9.4.2 Dermatolog*innen-Dashboard

Das Dashboard wurde von einer heterogenen Proband*innen-Gruppe getestet (D.2), die angaben, dass das Dashboard einen übersichtlichen Überblick gibt, der die Diagnose unterstützt (D.7) und erhielt dabei einen SUS-Score von 95,8 (D.1). Das Dashboard zeigt auf der Startseite eine Übersicht aller Patient*innen an (D.3), auf der einzelne Patient*innen für eine detaillierte Anzeige ausgewählt werden können. Die Detailansicht beinhaltet alle bei der Erstuntersuchung erhobenen

Patient*innendaten sowie den Krankheitsverlauf (D.4). Darin enthalten sind eine Diagramm-Visualisierung des DLQI-Verlaufs (D.5 und D.8) und ein Plug-In zur Weiterleitung an die visuelle 3D-Darstellung (D.6). Das Dashboard erfüllt somit alle Anforderungen.

Tabelle 9.9: Erfüllungsgrad der Anforderungen an das Dermatolog*innen-Dashboard

ID	Bereich	Anforderungen	Status
D.1	Nutzbarkeit	Das Dashboard muss in einer Nutzbarkeits-Evaluierung mit mind. 10 Testpersonen eine Nutzbarkeit im guten Bereich erzielen (SUS-Score > 71).	erfüllt
D.2	Nutzbarkeit	Die Nutzbarkeits-Evaluierung muss mit einer Personengruppe erfolgen, die eine heterogene Abdeckung von je drei unterschiedlichen Altersgruppen und technischen Kompetenzniveaus gewährleistet.	erfüllt
D.3	Patient*innenverwaltung	Das Dashboard muss eine Listenansicht aller Patient*innen bereitstellen, die eine schnelle Identifikation ermöglicht.	erfüllt
D.4	Patient*innenverwaltung	Das Dashboard muss eine Detailansicht pro Patient*in bereitstellen, welche alle zugehörigen Stammdaten sowie die medizinischen Verlaufsparemeter vollständig anzeigt.	erfüllt
D.5	Diagnose	Das Dashboard muss den zeitlichen Verlauf der erfassten Krankheitsdaten in Form von Diagrammen oder Graphen visualisieren.	erfüllt
D.6	Diagnose	Das Dashboard muss eine 3D-Darstellung der betroffenen Hautstellen unterstützen.	erfüllt
D.7	Diagnose	Das Dashboard muss alle diagnoserelevanten Metriken und Fotos so darstellen, dass sie als Entscheidungsgrundlage für die dermatologische Diagnose genutzt werden können.	erfüllt
D.8	Diagnose	Das Dashboard muss den aktuellen DLQI-Score sowie dessen zeitlichen Verlauf anzeigen, um die subjektive Krankheitslast quantifizierbar darzustellen.	erfüllt

9.4.3 3D-Modellierung

Die 3D-Modellierung basiert auf Smartphone-Videos, welche die Patient*innen selbstständig zu Hause anfertigen können (M.1). Die Verarbeitungszeit zur Generierung eines 3D-Modells betrug mit dem Gaussian Splatting-Verfahren durchschnittlich 12:19 Minuten und ermöglicht damit eine schnelle Bereitstellung, die für klinische Anwendungen geeignet ist (M.2). Sowohl die subjektive als auch die objektive Analyse zeigten, dass das Gaussian Splatting-Verfahren die Textur und Farbe der Hautstellen präzise abbildet (M.3). Die 3D-Modell-Erstellung erfüllt somit alle Anforderungen.

Tabelle 9.10: Erfüllungsgrad der Anforderungen an die 3D-Modell-Erstellung

ID	Bereich	Anforderungen	Status
M.1	Performance	Die 3D-Modell-Erstellung muss ausschließlich auf Basis von Smartphone-Bildmaterial erfolgen.	erfüllt
M.2	Performance	Die Erstellung der 3D-Modelle muss innerhalb eines Tages abgeschlossen sein.	erfüllt
M.3	Qualität	Die 3D-Modell-Erstellung muss die Hautstelle originalgetreu umsetzen.	erfüllt

9.4.4 Visuelle 3D-Darstellung

Sowohl die subjektive als auch die objektive Analyse zeigten, dass das Gaussian Splatting-Verfahren die Textur und Farbe der Hautstellen präzise abbildet, dies wurde auch durch die Dermatolog*innen bei der Diagnose bestätigt (V.1). Darüber hinaus ermöglicht die 3D-Darstellung eine uneingeschränkte Betrachtung aus allen aufgenommenen Blickwinkeln (V.2) und verfügt über eine Zoom-Funktion zur detaillierten Untersuchung von betroffenen Hautarealen (V.3). Die Nutzungsbewertung ergab einen SUS-Score von 81,6, was auf eine hohe Nutzbarkeit und intuitive Interaktion hinweist (V.4). An der Nutzbarkeits-Evaluierung nahmen 16 Dermatolog*innen teil, da aus Ressourcengründen kein Eingangsfragebogen mit

Alter und technischem Hintergrund ausgefüllt wurde, konnte die Anforderung V.5 aber nicht vollständig evaluiert werden. Die visuelle 3D-Darstellung erfüllt somit die vier getesteten Anforderungen.

Tabelle 9.11: Erfüllungsgrad der Anforderungen an die visuelle 3D-Darstellung

ID	Bereich	Anforderungen	Status
V.1	Qualität	Die visuelle 3D-Darstellung muss die Hautstelle originalgetreu abbilden.	erfüllt
V.2	Funktionen	Die 3D-Darstellung muss die Betrachtung aus verschiedenen Blickrichtungen ermöglichen.	erfüllt
V.3	Funktionen	Die Anwendung muss eine Zoom-in-Funktion zur Detailbetrachtung ermöglichen.	erfüllt
V.4	Nutzbarkeit	Die visuelle 3D-Darstellung muss in einer Nutzbarkeits-Evaluierung mit mind. 10 Testpersonen eine Nutzbarkeit im guten Bereich erzielen (SUS-Score > 71).	erfüllt
V.5	Nutzbarkeit	Die Nutzbarkeits-Evaluierung muss mit einer Personengruppe erfolgen, die eine heterogene Abdeckung von je drei unterschiedlichen Altersgruppen und technischen Kompetenzniveaus gewährleistet.	nicht getestet

9.4.5 Haptische 3D-Darstellung

Alle Proband*innen konnten korrekt identifizieren, wann ein haptisches Feedback ausgesendet wurde (H.1). Die haptischen Eigenschaften der ausgesendeten Modelle waren ausreichend fühlbar zur korrekten Identifizierung der 2D-Formen, nicht aber zu Identifizierung der 3D-Formen oder entsprechender Hautstellen (H.2 und H.3). Es war den Proband*innen möglich, in verschiedenen Intensitätsstufen 3D-Modelle korrekt zu identifizieren (H.4). Das UPA zeigte im Dauerbetrieb (H.5) und unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (H.6) keine Funktionseinschränkungen. Die haptische 3D-Darstellung erhielt in der Evaluierung mit einer heterogenen Proband*innengruppe einen SUS-Score von 78,2, was auf eine

intuitive Bedienbarkeit hindeutet (H.7 und H.8). Die Nutzbarkeit konnte noch nicht für den finalen Use-Case evaluiert werden, sondern nur für die Ertastung der vereinfachten Formen. Die haptische 3D-Darstellung konnte somit nicht alle Anforderungen erfüllen.

Tabelle 9.12: Erfüllungsgrad der Anforderungen an die haptische 3D-Darstellung

ID	Bereich	Anforderungen	Status
H.1	Haptisches Feedback	Die haptische 3D-Darstellung muss fühlbares Feedback erzeugen, das von mind. 90 % der Proband*innen wahrgenommen wird.	erfüllt
H.2	Haptisches Feedback	Die haptische 3D-Darstellung muss unterschiedliche haptische Formen so darstellen, dass diese von mind. 90 % der Proband*innen unterschieden und korrekt zugeordnet werden können.	nicht erfüllt
H.3	Haptisches Feedback	Die haptische 3D-Darstellung muss geometrische Details bis zu einer definierten räumlichen Auflösung von 1 mm darstellen, sodass Psoriasis-Plaques haptisch erfassbar sind.	nicht erfüllt
H.4	Haptisches Feedback	Die haptische 3D-Darstellung muss eine Regulierung der Feedback-Intensität in mindestens drei diskreten Stufen ermöglichen.	erfüllt
H.5	Betrieb	Die haptische 3D-Darstellung muss eine unterbrechungsfreie Laufzeit von mindestens 6 Stunden gewährleisten, ohne dass ein Neustart der Hardware oder Software erforderlich ist.	erfüllt
H.6	Betrieb	Die haptische 3D-Darstellung muss im Temperaturbereich von 18–28 °C ohne Funktionsverlust arbeiten.	erfüllt
H.7	Nutzbarkeit	Die haptische 3D-Darstellung muss in einer Nutzbarkeits-Evaluierung mit mind. 10 Testpersonen eine Nutzbarkeit im guten Bereich erzielen (SUS-Score > 71).	erfüllt
H.8	Nutzbarkeit	Die Nutzbarkeits-Evaluierung muss mit einer Personengruppe erfolgen, die eine heterogene Abdeckung von je drei unterschiedlichen Altersgruppen und technischen Kompetenzniveaus gewährleistet.	erfüllt

9.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Evaluierung zeigen das hohe Potenzial des entwickelten Systems für die Verbesserung der teledermatologischen Diagnose. Die Patient*innen-App und das Dermatolog*innen-Dashboard weisen durch ihr schlankes Design eine hohe Nutzbarkeit auf und wurden mit einer hohen Eignung für den jeweiligen Einsatzzweck bewertet.

Die 3D-Modell-Erstellung mit Gaussian Splatting liefert hervorragende Ergebnisse, die sowohl durch die qualitative als auch die quantitative Bewertung bestätigt wurden. Auch die visuelle 3D-Darstellung der betroffenen Hautstellen konnte sehr gute Ergebnisse erzielen. Dieser innovative Ansatz zur teledermatologischen Diagnose wurde von den teilnehmenden Dermatolog*innen sehr positiv bewertet. Insbesondere die verbesserte Darstellung der Läsionstopologie durch die bewegliche 3D-Darstellung gegenüber der bisherigen starren 2D-Darstellung wurde als sehr gewinnbringend für die Teledermatologie bewertet. Die Dermatolog*innen bewerteten den Ansatz nicht nur als technisch überzeugend, sondern auch als klinisch sinnvoll und äußerten eine klare Bereitschaft, das entwickelte System künftig für die teledermatologische Diagnose zu nutzen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Integration von 3D-Informationen in die teledermatologische Diagnostik einen relevanten Fortschritt darstellen kann.

Auch die haptische 3D-Darstellung in Form der Ultraschall-Technologie wurde über die Testrunden hinweg als spannend und vielversprechend bewertet. Es zeigte sich jedoch, dass der Entwicklungsstand dieser Technologie zum aktuellen Zeitpunkt nicht die für die diagnostische Bewertung notwendige Auflösung erreichen kann und somit für die teledermatologische Diagnose aktuell nicht geeignet ist. Marktbeobachtungen und Herstellerangaben bestätigen, dass die Technologie der Ultraschall-Haptik zwar vielversprechend ist, aber weiterhin technische Grenzen aufweist. Kommerzielle Entwicklungs-Kits, wie das Ultraeap wurden vom Markt genommen oder Produktlinien neu strukturiert [138]. Dies untermauert die Einschätzung, dass sich die Technologie noch in einem frühen Stadium befindet und weitere Forschung notwendig ist, um eine robuste Anwendung außerhalb von Prototypen-Umgebungen zu ermöglichen. Anknüpfungspunkte für

das 3D-Ausgabesystem wären hier die Nutzung kleinerer Ultraschallwandler, um eine höhere Auflösung zu ermöglichen oder leistungsfähigere MOSFETs, die es ermöglichen eine höhere Leistung in das UPA zu geben und so mehr Fokuspunkte deutlich fühlbar darzustellen. Auch das Handtracking konnte keine Verbesserung des haptischen Feedbacks bewirken und führte im Gegenteil eher zur Irritation der Proband*innen. Hier sind weiterführende Untersuchungen erforderlich, um zu evaluieren, ob das Handtracking bei Modellen mit einer höheren Anzahl an Fokuspunkten effektiv eingesetzt und ob dessen Qualität und Nutzbarkeit durch algorithmische Anpassungen verbessert werden können.

Die Testergebnisse zeigen jedoch auch, dass die Dermatolog*innen prinzipiell offen für diese Technologie sind und auf Basis der getesteten 2D- und 3D-Modelle Potenzial für den Einsatz in der Teledermatologie sehen.

Die Evaluierung der entwickelten Systembausteine zeigt insgesamt vielversprechende Ergebnisse. Während die haptische 3D-Darstellung noch am Anfang steht und weitere Forschung benötigt, bevor sie gewinnbringend in der Teledermatologie eingesetzt werden kann, konnte bei den anderen Bausteinen eine gute Nutzbarkeit und hohes Potenzial für die Teledermatologie nachgewiesen werden. Das entwickelte System kann somit ohne den Baustein der haptischen 3D-Darstellung bereits eingesetzt werden. Bei der evaluierten Implementierung handelt es sich allerdings noch um eine prototypische Umsetzung, die in einem begrenzten Rahmen evaluiert wurde. Eine belastbare Aussage zur Wirksamkeit oder zur Verbesserung der Diagnosegenauigkeit im klinischen Alltag erfordert eine Überführung des Systems in eine produktive Umgebung sowie eine validierende klinische Studie. Die Ergebnisse weisen aber auf ein hohes Anwendungspotenzial hin und wurden durch die quantitativen Evaluationsmetriken sowie die qualitative Rückmeldung der beteiligten Dermatolog*innen bestätigt. Die Rückmeldungen bestätigen die klinische Relevanz, während die hohe Akzeptanz die praktische Anschlussfähigkeit der entwickelten Ansätze unterstreicht.

9.6 Erkenntnisse im Kontext der Forschungsfragen

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Dissertation formulierten Forschungsfragen aufgegriffen und unter Einbezug der erzielten Ergebnisse diskutiert.

Forschungsfrage 1

Wie können 3D-Informationen technisch in ein teledermatologisches System integriert werden?

Bisherige teledermatologische Systeme basieren nahezu ausschließlich auf zweidimensionalen Bildinformationen. Die dermatologische Beurteilung erfolgt dabei auf Basis von Fotos, was die diagnostische Genauigkeit insbesondere bei Läsionen mit relevanter Tiefenstruktur einschränkt.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein System entwickelt, das die Integration von 3D-Informationen in eine teledermatologische Anwendung ermöglicht, ohne dass hierfür zusätzliche Hardware erforderlich ist. Patient*innen können alle benötigten Daten selbstständig mit handelsüblichen Smartphones erfassen. Dieses Vorgehen gewährleistet eine hohe Praxistauglichkeit und vermeidet Mehraufwand oder technische Hürden auf Seiten der Nutzenden. Für die 3D-Modellierung wurden verschiedene Rekonstruktions-Verfahren implementiert und evaluiert. Die Ergebnisse zeigten, dass ein Modellierungsprozess mit einer Vorverarbeitung der Smartphone-Videos, einer Kalibrierung mittels Structure-from-Motion und Multi-View Stereo und der darauf aufbauenden fotorealistischen 3D-Modellierung durch das Rekonstruktionsverfahren Gaussian Splatting die besten Ergebnisse für den Use-Case der teledermatologischen Diagnose liefert.

Das entwickelte System integriert die 3D-Daten sowohl visuell als auch haptisch. Die visuelle Komponente erlaubt eine räumliche Darstellung der Hautstelle, die aus verschiedenen Blickwinkeln und Zoomstufen betrachtet werden kann. Dadurch wird die klassische zweidimensionale Blickdiagnose um eine zusätzliche Tiefeninformation erweitert. Dermatolog*innen bewerteten diese Funktion im

Rahmen der Evaluation als besonders hilfreich und diagnostisch relevant. Die haptische Integration zielt darauf ab, eine virtuelle Tastdiagnose zu ermöglichen. Hier konnte die technische Machbarkeit durch den Einsatz eines Ultraschall-Phased-Arrays zur Erzeugung haptischer Rückmeldungen nachgewiesen werden. Der entwickelte Prototyp erreichte jedoch noch nicht die erforderliche Auflösung und Präzision, um eine realitätsnahe haptische Erfahrung zu gewährleisten. Somit konnte eine grundlegende technische Machbarkeit gezeigt, jedoch noch keine klinisch nutzbare Lösung bereitgestellt werden.

Forschungsfrage 2

Wie müssen visuelle und haptische 3D-Informationen aufbereitet werden, um eine realitätsnahe Abbildung von Hautveränderungen zu ermöglichen?

Für die visuelle Aufbereitung zeigte sich, dass insbesondere eine realistische Oberflächen- und Farbdarstellung und die Möglichkeit zur interaktiven Manipulation des Modells (Rotation und Zoom) entscheidend sind, um die Diagnose von Dermatolog*innen zu verbessern. In der Evaluierung wurde deutlich, dass Dermatolog*innen insbesondere von der verbesserten Tiefenwahrnehmung und korrekten Farbdarstellung profitieren.

Bei der haptischen Aufbereitung wurde untersucht, inwieweit die Ultraschall-Technologie in Form eines Ultraschall-Phased-Arrays genutzt werden kann, um Oberflächenstrukturen haptisch erfahrbar zu machen. Die Evaluierungen mit Proband*innen zeigten dabei, dass sich grundlegende topografische Unterschiede reproduzieren lassen. Für eine klinische Nutzung sind jedoch eine höhere Auflösung und eine intuitive Interaktionsgestaltung erforderlich.

Forschungsfrage 3

Wie beeinflusst die Anwendung eines nutzendenzentrierten Entwicklungsprozesses die Gestaltung und Wahrnehmung der Nutzbarkeit sowie die Akzeptanz teledermatologischer Systeme?

Die Nutzenden wurden im gesamten Entwicklungsprozess - von der initialen Ideenfindung über die Prototyping-Phasen bis hin zu wiederholten Evaluierungsrunden - aktiv miteinbezogen. Dieses Vorgehen führte zu einer hohen Übereinstimmung zwischen den entwickelten Funktionalitäten und den tatsächlichen Bedürfnissen der Endanwender*innen. Die Ergebnisse der finalen Evaluierungsrunde bestätigen den Erfolg dieses Ansatzes. Alle Systemkomponenten, mit denen Nutzende interagieren, erzielten SUS-Scores im guten, die meisten sogar im exzellenten Bereich. Die kontinuierliche Einbeziehung der Nutzenden erwies sich somit als zentraler Faktor für die Qualität, Akzeptanz und Praxistauglichkeit des entwickelten Systems und unterstreicht die Bedeutung der nutzendenzentrierten Entwicklung in digitalen telemedizinischen Anwendungen.

Insgesamt wurde nachgewiesen, dass die Integration von 3D-Informationen in teledermatologische Systeme technisch machbar und aus Sicht der Nutzenden sehr relevant ist. Während die visuelle Umsetzung bereits eine Erweiterung der diagnostischen Möglichkeiten bietet, eröffnet die haptische Komponente ein zukünftiges Potenzial für eine noch realitätsnähere Fernuntersuchung. Gleichzeitig unterstreicht die Dissertation die zentrale Bedeutung nutzendenzentrierter Entwicklungsansätze für die Akzeptanz und Nutzbarkeit solcher Systeme.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Die steigende Prävalenz von Hauterkrankungen und der zunehmende Fachkräftemangel in der Dermatologie führen zu wachsenden Versorgungslücken. Teledermatologie bietet das Potenzial, die begrenzten Ressourcen der Dermatolog*innen effizienter einzusetzen und damit sowohl Ärzt*innen als auch Patient*innen zu entlasten. Insbesondere Patient*innen mit chronischen Hauterkrankungen weisen einen langfristig hohen Versorgungsbedarf auf. Hier können teledermatologische Systeme einen besonderen Mehrwert bieten, indem Vor-Ort-Termine reduziert und Therapieverläufe digital dokumentiert werden.

Studien zeigen jedoch, dass die derzeit verfügbaren teledermatologischen Systeme, die überwiegend zweidimensionale Bildinformationen nutzen, bislang keine gleichbleibend hohe Diagnosegenauigkeit ermöglichen. Insbesondere das Vertrauen der Dermatolog*innen in die Zuverlässigkeit ihrer Ferndiagnose ist häufig zu gering, was die breite Nutzung dieser Systeme einschränkt.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen dieser Dissertation ein teledermatologisches System entwickelt, das 3D-Informationen sowohl visuell als auch haptisch in die Ferndiagnose integriert. Ein zentraler Anspruch bestand darin, ein praxistaugliches und intuitiv nutzbare System zu schaffen. Entsprechend wurde ein nutzendenzentrierter Entwicklungsprozess gewählt, der Dermatolog*innen und Patient*innen von Beginn an einbezog und ihre Bedürfnisse systematisch in die Gestaltung einfließen ließ.

Eine umfassende Anforderungsanalyse, die Hospitationen in Kliniken und Workshops mit den identifizierten Nutzengruppen beinhaltete, diente nicht nur der Funktionsdefinition, sondern auch dem Verständnis realer Nutzungskontexte.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden Personas und User Stories entwickelt, die die Bedürfnisse, Wünsche und Herausforderungen der unterschiedlichen Nutzengruppen widerspiegeln und ein Anforderungskatalog für das zu entwickelnde System abgeleitet.

Auf dieser Grundlage wurde ein modulares Gesamtsystem konzipiert, bestehend aus einer Patient*innen-App zur Datenaufnahme, einem Backend zur Verarbeitung der Bild- und Fragebogen-Daten sowie einem Dashboard für Dermatolog*innen zur Visualisierung der Ergebnisse.

Für die Generierung der 3D-Informationen wurde eine 3D-Modellierung der Hautstellen umgesetzt. Diese erfolgt auf Basis unkalibrierter Bilder, die aus Smartphone-Videos extrahiert werden, welche die Patient*innen selbstständig mit der App aufnehmen können. Dadurch wird sichergestellt, dass auf Patient*innen-Seite keine zusätzliche Hardware zur Datenaufnahme erforderlich ist und die Datenaufnahme intuitiv mit dem eigenen Smartphone erfolgen kann. Es wurden mehrere Verfahren zur 3D-Rekonstruktion untersucht, wobei Gaussian Splatting als bestgeeignetes Verfahren für die realistische Modellierung identifiziert und in die 3D-Modellierungs-Pipeline integriert wurde.

Die resultierenden 3D-Modelle werden den Dermatolog*innen visuell dargestellt. Die visuelle 3D-Darstellung wird aus dem Dermatolog*innen-Dashboard heraus gestartet, sodass toolgestützt die Hautläsionen mithilfe von integrierten Rotations- und Zoom-Funktionen detailliert untersucht werden können.

Ergänzend wurde zur haptischen 3D-Darstellung ein Ultraschall-Phased-Array-System, das die haptische Erastung virtueller Hautoberflächen ermöglicht, prototypisch aufgebaut, iterativ optimiert und für den Anwendungsfall der Teledermatologie evaluiert. Zur Ansteuerung wurde eine Software entwickelt, die alle Anforderungen des Anforderungskatalogs erfüllt und die Modelle mittels raumzeitlicher Modulation darstellt. Die haptische Ausgabe kann ebenfalls über das Dermatolog*innen-Dashboard gestartet werden.

Die Teilsysteme wurden während der Entwicklung gemäß dem nutzendenzentrierten Ansatz regelmäßig mit den Nutzenden evaluiert. Die Ergebnisse der Evaluation unterstreichen das hohe Potenzial des entwickelten Systems. Dermatolog*innen bewerteten die interaktive 3D-Darstellung der Hautläsionen als technisch überzeugend, klinisch relevant und in hohem Maße anwendungsnah. Insbesondere die

Möglichkeit, die Läsionstopologie räumlich zu erfassen, wurde als entscheidender Fortschritt für die teledermatologische Diagnostik hervorgehoben. Mehrere Teilnehmende äußerten ausdrücklich die Bereitschaft, das System künftig in der klinischen Praxis einzusetzen.

Auch die haptische Komponente wurde als innovativ wahrgenommen, wenngleich sie sich noch im experimentellen Entwicklungsstadium befindet. Die technisch mögliche Auflösung und Präzision der Ultraschallhaptik reichten zum Zeitpunkt der Entwicklung nicht aus, um für eine diagnostische Bewertung herangezogen zu werden. Dennoch zeigten die Rückmeldungen der Dermatolog*innen, dass grundsätzlich ein Interesse und eine Offenheit gegenüber der haptischen Interaktion bestehen. Die Patient*innen-App und das Dashboard erzielten durch ihr schlankes, aufgabenorientiertes Design hohe Nutzbarkeitswerte. Die Testergebnisse deuten darauf hin, dass das Gesamtsystem – insbesondere die visuelle 3D-Komponente – die teledermatologische Diagnostik substantiell erweitern könnte.

10.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Dissertation verdeutlichen, dass die Integration von 3D-Informationen in teledermatologische Systeme ein hohes Potenzial besitzt, die Qualität und Akzeptanz der Ferndiagnose nachhaltig zu verbessern.

Die Untersuchungen zeigen zugleich einen spezifischen Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der haptischen 3D-Darstellung auf. Die derzeitigen UPA-Systeme bieten zwar die Möglichkeit einer berührungslosen haptischen Rückmeldung, sind jedoch in der räumlichen Auflösung und Anzahl simultan darstellbarer Fokuspunkte noch limitiert. Zentrale Anknüpfungspunkte zur technischen Optimierung sind eine Erhöhung der räumlichen Auflösung, beispielsweise durch den Einsatz kleinerer Ultraschallwandler oder anderer Bauteile, die eine höhere Energie aufnehmen und an die Ultraschallwandler übertragen können, die Steigerung der Präzision der Fokuspunkterzeugung durch die Entwicklung effizienterer Signalfade und die Evaluierung alternativer Modulationsverfahren, um die haptische Wahrnehmung und Stabilität der Darstellung zu verbessern.

Darüber hinaus eröffnet das entwickelte System neue Perspektiven für die Dokumentation von Krankheitsverläufen. Insbesondere die Kombination von subjektiven Patient*innenangaben durch PROMs mit objektiven 3D-Daten bietet das Potenzial, Krankheitsverläufe präziser zu erfassen und Therapieentscheidungen datenbasiert zu unterstützen. In welchem Maß die Integration von visuellen und haptischen 3D-Informationen die diagnostische Genauigkeit und das Vertrauen der Dermatolog*innen tatsächlich verbessert, muss durch eine groß angelegte klinische Studie validiert werden. Auch muss vor dem Einsatz als Produktivsystem eine umfassende Datenschutzbetrachtung erfolgen, um die sichere Verarbeitung und den Schutz der sensiblen Gesundheitsdaten der Patient*innen verlässlich zu gewährleisten.

Langfristig sollte das entwickelte System in eine umfassendere telemedizinische Infrastruktur eingebettet werden und verschiedene Fachdisziplinen vernetzen. Neben der Erweiterung auf weitere Hauterkrankungen, wären ähnliche Konzepte auch in anderen medizinischen Bereichen denkbar, etwa in der plastischen Chirurgie, Wundversorgung oder Onkologie, wo visuelle und haptische Informationen eine zentrale Rolle spielen.

A Anhang

A.1 Fragebögen

A.1.1 Fragebogen zur Erfassung des Hautbefindens

1. Wie stark waren die Schmerzen an der ausgewählten Hautstelle in den letzten 7 Tagen?
☐ sehr gering ☐ gering ☐ mittel ☐ stark ☐ sehr stark
2. Wie stark hat die ausgewählte Hautstelle in den letzten 7 Tagen gejuckt?
☐ sehr gering ☐ gering ☐ mittel ☐ stark ☐ sehr stark
3. Wie aktiv waren Sie in den letzten 7 Tagen (z. B. im Alltag, bei Bewegung oder Freizeitaktivitäten)?
☐ überhaupt nicht ☐ wenig ☐ mittel ☐ ziemlich ☐ sehr
4. Wie gut war Ihre Stimmung in den letzten 7 Tagen insgesamt?
☐ sehr schlecht ☐ schlecht ☐ mittel ☐ gut ☐ sehr gut
5. Wie stark waren Ihre Gelenkschmerzen in den letzten 7 Tagen?
☐ sehr gering ☐ gering ☐ mittel ☐ stark ☐ sehr stark
6. Haben Sie in den letzten 7 Tagen Nebenwirkungen Ihrer Behandlung bemerkt? Wenn ja, wie stark waren diese?
☐ sehr gering ☐ gering ☐ mittel ☐ stark ☐ sehr stark

7. Wie regelmäßig haben Sie Ihre Behandlung in den letzten 7 Tagen angewendet oder eingenommen?

☐ überhaupt nicht ☐ wenig ☐ mittel ☐ ziemlich ☐ sehr

A.1.2 Fragebogen zur Erfassung der Lebensqualität (DLQI)

Der DLQI-Fragebogen [18] besteht aus 10 Fragen, die die Auswirkungen einer Hauterkrankung auf die Lebensqualität abbilden.

1. **Wie sehr hat Ihre Haut in den vergangenen 7 Tagen gejuckt, war wund, hat geschmerzt oder gebrannt?**
☐ überhaupt nicht ☐ ein bisschen ☐ ziemlich ☐ sehr
2. **Wie sehr hat Ihre Hauterkrankung Sie in den vergangenen 7 Tagen verlegen oder befangen gemacht?**
☐ überhaupt nicht ☐ ein bisschen ☐ ziemlich ☐ sehr
3. **Wie sehr hat Ihre Hauterkrankung Sie in den vergangenen 7 Tagen bei Einkäufen oder bei Haus- oder Gartenarbeit behindert?**
☐ überhaupt nicht ☐ ein bisschen ☐ ziemlich ☐ sehr
4. **Wie sehr hat Ihre Hauterkrankung die Wahl der Kleidung beeinflusst, die Sie in den vergangenen 7 Tagen getragen haben?**
☐ überhaupt nicht ☐ ein bisschen ☐ ziemlich ☐ sehr
5. **Wie sehr hat Ihre Hauterkrankung in den vergangenen 7 Tagen Ihre Aktivitäten mit anderen Menschen oder Ihre Freizeitgestaltung beeinflusst?**
☐ überhaupt nicht ☐ ein bisschen ☐ ziemlich ☐ sehr
6. **Wie sehr hat Ihre Hauterkrankung es Ihnen in den vergangenen 7 Tagen erschwert, sportlich aktiv zu sein?**
☐ überhaupt nicht ☐ ein bisschen ☐ ziemlich ☐ sehr
7. **Hat Ihre Hauterkrankung in den vergangenen 7 Tagen dazu geführt, dass Sie Ihrer beruflichen Tätigkeit nicht nachgehen oder nicht studieren konnten?**
☐ ja ☐ nein
Falls "nein", wie sehr ist Ihre Hauterkrankung in den vergangenen 7 Tagen ein Problem bei Ihrer beruflichen Tätigkeit bzw. Ihrem Studium gewesen?
☐ überhaupt nicht ☐ ein bisschen ☐ ziemlich ☐ sehr

8. **Wie sehr hat Ihre Hauterkrankung in den vergangenen 7 Tagen Probleme im Umgang mit Ihrem Partner, Freunden oder Verwandten verursacht?**
☐ überhaupt nicht ☐ ein bisschen ☐ ziemlich ☐ sehr
9. **Wie sehr hat Ihre Hauterkrankung in den vergangenen 7 Tagen Ihr Liebesleben beeinträchtigt?**
☐ überhaupt nicht ☐ ein bisschen ☐ ziemlich ☐ sehr
10. **Inwieweit war die Behandlung Ihrer Haut in den vergangenen 7 Tagen für Sie mit Problemen verbunden (z. B. weil die Behandlung Zeit in Anspruch nahm oder dadurch Ihr Haushalt unsauber wurde)?**
☐ überhaupt nicht ☐ ein bisschen ☐ ziemlich ☐ sehr

A.1.3 SUS-Fragebogen

Der System Usability Scale (SUS)-Fragebogen [83] besteht aus 10 Fragen, die die Nutzbarkeit des Systems evaluieren.

Bitte geben Sie den Grad Ihrer Zustimmung zu folgenden Aussagen an.	Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	Neutral	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
1. Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.	o	o	o	o	o
2. Ich empfinde das System als unnötig komplex.	o	o	o	o	o
3. Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.	o	o	o	o	o
4. Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.	o	o	o	o	o
5. Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.	o	o	o	o	o
6. Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.	o	o	o	o	o
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.	o	o	o	o	o
8. Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.	o	o	o	o	o
9. Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.	o	o	o	o	o
10. Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.	o	o	o	o	o

A.1.4 Fragebogen zur Evaluierung der 3D-Modelle und visuellen 3D-Darstellung

1. Allgemeine Eindrücke

- Wie gut können Sie die Hautveränderungen im 3D-Modell im Vergleich zum 2D-Foto erkennen?

Sehr schlecht	2	3	4	Sehr gut

- Welches Medium bietet eine klarere Darstellung der Hautveränderungen?

- ☐ 2D-Foto
☐ 3D-Modell
☐ Kein Unterschied

2. Visuelle Bewertung

Bitte geben Sie den Grad Ihrer Zustimmung zu folgenden Aussagen an.	Sehr schlecht	2	3	4	Sehr gut
Erkennbarkeit der Hautveränderung (Rötung, Schuppung etc.)					
Detailgenauigkeit der Hautstruktur					
Erkennung von Übergängen zwischen gesunder und betroffener Haut					
Möglichkeit zur Betrachtung von verschiedenen Perspektiven					
Einschätzung der Plaque-Erhöhung					

3. Beurteilung der klinischen Nützlichkeit

- Wie gut helfen Ihnen die 3D-Modelle im Vergleich zu den 2D-Fotos bei der Diagnose von Psoriasis?

Sehr schlecht	2	3	4	Sehr gut

- Können Sie mit den 3D-Modellen eine präzisere Beurteilung der Schwere der Hauterkrankung vornehmen?

- ☐ Ja
☐ Nein, weil _____

- Gibt es spezifische Merkmale, die nur in den 3D-Modellen und nicht in den 2D-Fotos besser erkennbar sind?

- ☐ Ja, folgende:

- ☐ Nein:

- Wie hilfreich sind die 3D-Modelle bei der Planung einer Fernbehandlung?

Nicht hilfreich	2	3	4	Sehr hilfreich

- Gibt es Aspekte der Behandlung (z. B. Dosierung, Anwendung von Cremes), die Sie aufgrund der 3D-Modelle besser anpassen können?

- ☐ Ja
☐ Nein

4. Zugänglichkeit und Benutzerfreundlichkeit

SUS	Stimme voll und ganz zu	Stimme zu	neutral	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
1. Ich kann mir sehr gut vorstellen, das System regelmäßig zu nutzen.					
2. Ich empfinde das System als unnötig komplex.					
3. Ich empfinde das System als einfach zu nutzen.					
4. Ich denke, dass ich technischen Support brauchen würde, um das System zu nutzen.					
5. Ich finde, dass die verschiedenen Funktionen des Systems gut integriert sind.					
6. Ich finde, dass es im System zu viele Inkonsistenzen gibt.					
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.					
8. Ich empfinde die Bedienung als sehr umständlich.					
9. Ich habe mich bei der Nutzung des Systems sehr sicher gefühlt.					
10. Ich musste eine Menge Dinge lernen, bevor ich mit dem System arbeiten konnte.					

5. Klinische Entscheidungsfindung und Präferenz

- Welches Medium bevorzugen Sie für eine genaue Fern-Diagnose?
 - ☐ 2D-Foto
 - ☐ 3D-Modell
 - ☐ Keine Präferenz
- Welches Medium bevorzugen Sie, um die Behandlung für einen Patienten zu planen?
 - ☐ 2D-Foto
 - ☐ 3D-Modell
 - ☐ Keine Präferenz
- Falls Sie zwischen 2D-Fotos und 3D-Modellen wählen müssten, welches Medium würden Sie bei der Fernbehandlung von Psoriasis bevorzugen?
 - ☐ 2D-Foto
 - ☐ 3D-Modell
 - ☐ Keine Präferenz

6. Zusätzliche Rückmeldungen

- Haben Sie Verbesserungsvorschläge für die 3D-Modelle oder die Art der Präsentation?
- Gab es Aspekte, bei denen das 3D-Modell nicht hilfreich war?
- Welche Funktionen oder Features würden Sie in zukünftigen 3D-Modellen von Psoriasis-Hautstellen erwarten?

A.1.5 Eingangs-Fragebogen zur Evaluierung der haptischen 3D-Darstellung

Eingangsfragebogen

1. Bitte geben Sie ihr Alter in Jahren an:

2. Bitte geben Sie ihr Geschlecht an:

☐

weiblich

☐

männlich

☐

divers

3. Welchen Beruf üben Sie aus?

4. Wie lange üben Sie Ihren Beruf bereits aus?

5. Welche Bedeutung hat die haptische Wahrnehmung für Ihre Arbeit?

6. Üben Sie in Ihrer Freizeit Aktivitäten aus, die die Feinmotorik fördern (Instrument, Handarbeiten, Gaming o.ä.)?

☐

nein

☐

ja, ich übe folgende Aktivität(en) aus:

7. Haben Sie schon einmal Erfahrung mit einem taktilen Interface gemacht, das haptisches Feedback liefert?

☐

ja

☐

nein

8. Welche ist Ihre dominante Hand?

☐ rechte Hand

☐ linke Hand

9. Hatten Sie schon einmal oder haben Sie aktuell eine Verletzung/Erkrankung an Ihrer dominanten Hand oder Ihren Fingern?

☐ nein

☐ ja, ich hatte/habe folgende Verletzungen/Vorerkrankungen an meiner dominanten Hand/meinen Fingern:

10. Sind Sie Raucher?

☐ ja

☐ nein

11. Wie fühlen Sie sich aktuell?

sehr müde/erschöpft ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ überhaupt nicht müde/erschöpft

sehr unkonzentriert ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ sehr konzentriert

sehr unmotiviert ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ sehr motiviert

A.1.6 Eingangs-Fragebogen zur Evaluierung der Nutzbarkeit der Patient*innen-App

Evaluation der Patient*innen-App

Beschreibung

Im Rahmen des Projekts HybridVITA wurde eine App entwickelt. Ziel des Projektes ist es, die Versorgung von Menschen mit chronischen Hauterkrankungen (zum Beispiel Psoriasis, „Schuppenflechte“) zu verbessern.

Die App ermöglicht es Patient*innen ihren Krankheitsverlauf zu dokumentieren und Fotos von betroffenen Hautregionen aufzunehmen.

Im Folgenden wird ein Test durchgeführt, um die Gebrauchstauglichkeit des Systems zu evaluieren. Dabei bearbeitest du verschiedene Aufgaben mit der App und beantwortest im Anschluss Fragen zur Nutzung.

Wichtig: Nicht du wirst getestet, sondern das System. Du kannst dabei nichts falsch machen.

Fragen zu Teilnehmer*innen

Welcher Altersgruppe gehörst du an?

- ☐ 17 oder jünger
- ☐ 18 – 24
- ☐ 25 – 34
- ☐ 35 – 50
- ☐ Über 50

Wie schätzt du deine Technikaffinität ein?

- ☐ Sehr hoch
- ☐ Hoch
- ☐ Mittel
- ☐ Gering
- ☐ Sehr gering

Wie häufig nutzt du digitale Geräte wie Smartphone, Laptop oder Tablet im Alltag?

- ☐ Täglich
- ☐ Mehrmals pro Woche
- ☐ Seltener
- ☐ Nie

Was machst du derzeit beruflich oder wie verbringst du deinen Alltag (Studium, Ausbildung)?

A.1.7 Fragebogen zur Evaluierung der Patient*innen-App

Evaluation App

Im nächsten Schritt bekommst du verschiedene Aufgaben, die du mit der App bearbeiten sollst. Bitte versuche die Aufgaben möglichst selbstständig zu lösen. Wenn du allein nicht mehr weiterkommst, helfe ich dir weiter.

Denk bitte laut und beschreibe, was du gerade machst.

Aufgabe A1: neue Region erfassen

Stell dir vor, du nutzt die App zum ersten Mal und hast noch kein Konto. Du hast an deinem linken Unterarm eine neue Hautveränderung bemerkt, die du im System hinzufügen möchtest.

- Nimm in der App ein Foto der neuen Region auf.
- Fülle den Fragebogen dazu aus, um weitere Informationen zu dokumentieren.

Hinweis: Verwende zur Registrierung die User-ID 1000

Aufgabe A2: Fotos ansehen

Du möchtest dir das Foto anschauen, das du gerade von deiner Hautveränderung aufgenommen und gespeichert hast.

Aufgabe A3: DLQI-Fragebogen ausfüllen

Der Dermatology Life Quality Index (DLQI) hilft dir dabei, deinen Hautzustand und dessen Auswirkungen auf deinen Alltag besser zu verstehen.

- Fülle den Fragebogen aus.
- Wie interpretierst du das Ergebnis?

Aufgabe A4: Behandlung hinzufügen

Um deine Behandlungen besser im Blick zu behalten, möchtest du eine neue Therapie in deinen Plan aufnehmen.

- Füge eine neue Behandlung hinzu, die Angaben kannst du frei wählen.
- Melde dich dann vom System ab.

Fragebogen zur App

Welche Schwierigkeiten hattest du bei der Nutzung der App?

Was hat dir an der App gut gefallen?

Was sollte deiner Meinung nach verbessert werden?

Was ist dein Gesamteindruck der App?

Nr.	Frage	Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll zu
1	Ich denke, dass ich das System häufig benutzen würde.	☐	☐	☐	☐	☐
2	Ich fand das System unnötig komplex.	☐	☐	☐	☐	☐
3	Ich fand das System einfach zu benutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
4	Ich glaube, ich würde die Hilfe einer technisch versierten Person benötigen, um das System benutzen zu können.	☐	☐	☐	☐	☐
5	Ich fand, die verschiedenen Funktionen in diesem System waren gut integriert.	☐	☐	☐	☐	☐
6	Ich denke, das System enthielt zu viele Inkonsistenzen.	☐	☐	☐	☐	☐
7	Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit diesem System sehr schnell lernen.	☐	☐	☐	☐	☐
8	Ich fand das System sehr umständlich zu nutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
9	Ich fühlte mich bei der Benutzung des Systems sehr sicher.	☐	☐	☐	☐	☐
10	Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte, das System zu verwenden.	☐	☐	☐	☐	☐

A.1.8 Eingangs-Fragebogen zur Evaluierung des Dermatolog*innen-Dashboards

Evaluation des Dermatolog*innen-Dashboard

Beschreibung

Im Rahmen des Projekts HybridVITA wurden ein Dashboard entwickelt. Ziel des Projektes ist es, die Versorgung von Menschen mit chronischen Hauterkrankungen (zum Beispiel Psoriasis, „Schuppenflechte“) zu verbessern.

Das Dashboard wird von den behandelnden Ärzt*innen genutzt, um die Krankheitsentwicklung anhand von verschiedenen Informationen nachvollziehen zu können.

Im Folgenden wird ein Test durchgeführt, um die Gebrauchstauglichkeit des Systems zu evaluieren. Dabei bearbeitest du verschiedene Aufgaben mit dem Dashboard und beantwortest im Anschluss Fragen zur Nutzung.

Wichtig: Nicht du wirst getestet, sondern das System. Du kannst dabei nichts falsch machen.

Fragen zu Teilnehmer*innen

Welcher Altersgruppe gehörst du an?

- ☐ 17 oder jünger
- ☐ 18 – 24
- ☐ 25 – 34
- ☐ 35 – 50
- ☐ Über 50

Wie schätzt du deine Technikaffinität ein?

- ☐ Sehr hoch
- ☐ Hoch
- ☐ Mittel
- ☐ Gering
- ☐ Sehr gering

Wie häufig nutzt du digitale Geräte wie Smartphone, Laptop oder Tablet im Alltag?

- ☐ Täglich
- ☐ Mehrmals pro Woche
- ☐ Seltener
- ☐ Nie

Was machst du derzeit beruflich oder wie verbringst du deinen Alltag (Studium, Ausbildung)?

A.1.9 Fragebogen zur Evaluierung des Dermatolog*innen-Dashboards

Evaluation Dashboard

Nun bearbeitest du Aufgaben mit dem Dashboard. Bitte versuche, die Aufgaben möglichst selbstständig zu lösen. Wenn du allein nicht weiterkommst, helfe ich dir weiter.

Denk auch hier laut und beschreibe, was du gerade machst.

Stelle dir dabei vor, du bist Ärztin oder Arzt und nutzt das Dashboard, um den Krankheitsverlauf zu beurteilen.

Aufgabe D1: Patient*in hinzufügen

Stelle dir vor, ein neuer Patient kommt in deine Praxis, um in die digitale Betreuung aufgenommen zu werden. Du arbeitest schon länger mit dem System und hast schon ein Konto.

- Lege den neuen Patienten an, die Daten können frei gewählt werden.
- Rufe anschließend das Profil des neuen Patienten auf.

Hinweis Benutzername: test, Passwort: test123

Aufgabe D2: Therapie planen

Der Krankheitsverlauf des Patienten Tom Meier hat sich zuletzt verschlechtert und sein Therapieplan muss angepasst werden.

- Informiere dich zunächst über die bisherigen Therapien des Patienten.
- Füge anschließend eine neue Therapie hinzu. Die Werte kannst du dabei frei wählen.

Aufgabe D3: Patientendaten aktualisieren

Bei der Patientin Clara Zimmer treten neue Symptome auf, die auch im System aktualisiert werden sollen (z.B. Juckreiz, Hautrötungen).

- Aktualisiere die Symptome der Patientin.

Aufgabe D4: Verlaufskontrolle durchführen

Du möchtest den aktuellen Gesundheitszustand der Patientin Nina Niedlich überprüfen, die seit einiger Zeit im System hinterlegt ist.

- Schau dir dazu die Fotos an, die die Patientin am 28.05.2025 aufgenommen hat.
- Schau dir außerdem die bisher dokumentierten DLQI-Werte der Patientin an und nenne mir den zuletzt dokumentierten DLQI-Wert.
- Melde dich dann vom System ab.

Fragebogen zum Dashboard

Welche Schwierigkeiten hattest du bei der Nutzung des Dashboards?

Was hat dir an dem Dashboard gut gefallen?

Was sollte deiner Meinung nach verbessert werden?

Was ist dein Gesamteindruck des Dashboards?

Nr.	Frage	Stimme überhaupt nicht zu				Stimme voll zu
1	Ich denke, dass ich das System häufig benutzen würde.	☐	☐	☐	☐	☐
2	Ich fand das System unnötig komplex.	☐	☐	☐	☐	☐
3	Ich fand das System einfach zu benutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
4	Ich glaube, ich würde die Hilfe einer technisch versierten Person benötigen, um das System benutzen zu können.	☐	☐	☐	☐	☐
5	Ich fand, die verschiedenen Funktionen in diesem System waren gut integriert.	☐	☐	☐	☐	☐
6	Ich denke, das System enthielt zu viele Inkonsistenzen.	☐	☐	☐	☐	☐
7	Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit diesem System sehr schnell lernen.	☐	☐	☐	☐	☐
8	Ich fand das System sehr umständlich zu nutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
9	Ich fühlte mich bei der Benutzung des Systems sehr sicher.	☐	☐	☐	☐	☐
10	Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte, das System zu verwenden.	☐	☐	☐	☐	☐

A.2 Ergebnisse der Literaturrecherche zur Diagnosegenauigkeit in der Teledermatologie

Tabelle A.1 zeigt die Ergebnisse wichtiger Studien zur Diagnose-Genauigkeit von In-Person-Diagnosen (IP), teledermatologischer Diagnose (TD) und histologischer Diagnose (HD).

Tabelle A.1: Ergebnisse von Studien zur Diagnosegenauigkeit in der Teledermatologie

Author*in	Jahr	Pat.-Anzahl	Hautkrankheiten	Diagnosegenauigkeit
Oztas et al. [112]	2004	125	alle	IP-TD nur Fotos: 57 % IP-TD mit zusätzlichen Infos: 70 %
Edison et al. [8]	2008	110	alle	IP-TD: 66 % k=0,618 IP-Vertrauen: 87 % TD-Vertrauen: 54 %
Heffner et al. [121]	2009	-	Ausschläge	Intrater-Reliabilität TD: 82 % ($\kappa=0,8$) Interrater-Reliabilität TD-TD: 73 % ($\kappa=0,69$) IP-TD: 69 % ($\kappa=0,65$)
Singh et al. [119]	2011	12	Psoriasis	IP-TD1: $\kappa=0,41/0,62$ IP-TD2: $\kappa=0,55/0,71$
Lasierra et al. [120]	2012	120	alle	Entzündliche Dermatosen: 76 % Erwachsene /62 % Kinder Hautinfektionen und -befall: 75 % Erwachsene /83 % Kinder Tumore: 79 % Erwachsene / 80 % Kinder Sonstiges: 55 % Erwachsene /100 % Kinder nur bei 50/120 sichere Diagnose durch TD
Nami et al. [7]	2014	391	alle außer pigmentierte Läsionen	IP-TD: 91,1 %

Tabelle A.1: Ergebnisse von Studien zur Diagnosegenauigkeit in der Teledermatologie (Fortsetzung)

Autor*in	Jahr	Pat.-Anzahl	Hautkrankheiten	Diagnosegenauigkeit
				$\kappa=0,906$
Marchell et al. [122]	2017	214	alle	IP-TD: 76 %
O'Connor et al. [123]	2017	40	alle	IP-TD: 83 % $\kappa=0,81$ Sensitivität: 0,71 Spezifität: 0,85 TD-HD: 65 % 6 der 18 nicht durch TD zur Biopsie zugelassenen hatten Hautkrebs
Giavina-Bianchi et al. [117]	2020	739	Entzündliche Dermatosen	IP-TD: 78 % $\kappa=0,743$
Giavina-Bianchi et al. [116]	2020	109	Atopische Dermatitis	IP-TD: 84,4 %
Gerhardt et al. [124]	2021	809	alle	IP-TD: 75,3 % 60,2 % zusätzliche Diagnosen bei IP
Clarke et al. [115]	2023	206	alle außer Ausschläge	IP-TD: 66,6 % $\kappa=0,60$ TD-HD: 65 % Sensitivität: 0,71 Spezifität: 0,85 Intrater-Reliabilität: $\kappa=0,64$

Tabelle A.1: Ergebnisse von Studien zur Diagnosegenauigkeit in der Teledermatologie (Fortsetzung)

Autor*in	Jahr	Pat.-Anzahl	Hautkrankheiten	Diagnosegenauigkeit
				Interrater-Reliabilität: $\kappa=0,71$
Saade et al. [113]	2024	-	alle	IP-TD Pat.-Fotos: 79 % IP-TD angeleitete Pat.-Fotos: 84 % IP-TD Fotos durch Klinik: 87 %
Patel et al. [114]	2024	265	alle, nur BZ-Karzinom bei Krebs	IP-TD: 76,4 % TD-HD: 66,2 % IP-HD: 80,6 %
Artun et al. [118]	2024	113	Entzündlich rheumatisch mit Haut/Nägel	TD I-HD: $\kappa=0,95$ TD2-HD: $\kappa=0,82$

A.3 Detaillierte Beschreibung des Testaufbaus der Evaluierung der haptischen 3D-Darstellung

A.3.1 Phase I: Evaluierung der Genauigkeit

A.3.1.1 Testfall I.1: Haptisches Feedback erkennen

Der Test besteht aus zwei Schritten. In beiden Schritten soll identifiziert werden, ob haptisches Feedback durch das UPA ausgesendet wird. Im ersten Schritt (I.1-1) wird haptisches Feedback ausgesendet. Im zweiten Schritt (I.1-2) erfolgt die Gegenprobe und es wird kein Feedback ausgesendet.

A.3.1.2 Testfall I.2: 2D-Formen erkennen

In diesem Test müssen die Proband*innen verschiedene 2D-Formen richtig erkennen. Die genutzten Formen sind in Abbildung A.1 zu sehen. Der Test teilt sich in sechs Testschritte.

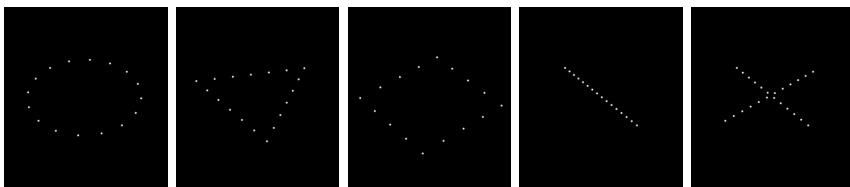
In den ersten zwei Testschritten wissen die Proband*innen, welche Form ausgesendet wird und sollen bestätigen, dass sie diese Form auch identifizieren konnten. Hierfür wurden die beiden Formen **Kreis** (Testschritt I.2-1) und **Linie** (Testschritt I.2-2) gewählt, da diese die größtmöglichen Formunterschiede aufweisen. Auf diese Weise kann ein Gefühl für die Ausstrahlung von Formen durch Ultraschall vermittelt werden.

In den nächsten zwei Schritten wird den Proband*innen die Auswahl aus zwei Formen gegeben und sie müssen entscheiden, welche sie identifiziert haben.

In Testschritt I.2-3 stehen die Formen *Kreuz* und *Linie* zur Auswahl. Ausgesendet wird dabei das **Kreuz**. In Testschritt I.2-4 ist die Wahl zwischen *Dreieck* und *Kreis*, wobei das **Dreieck** tatsächlich ausgesendet wird. Die Auswahl zwischen diesen zwei ähnlichen Formen dient dazu, die Klarheit der Formen und insbesondere der Ecken zu bestimmen.

Tabelle A.2: Aufbau Testfall I.2

Testschritt	Form	Hilfestellung
I.2-1	Kreis	Form bekannt
I.2-2	Linie	Form bekannt
I.2-3	Kreuz	Wahl zwischen Kreuz und Linie
I.2-4	Dreieck	Wahl zwischen Dreieck und Kreis
I.2-5	Kreis	keine
I.2-6	Quadrat	keine

**Abbildung A.1:** Visualisierung der generierten 2D-Formen innerhalb der entwickelten Software.

In den Testschritten I.2-5 und I.2-6 gibt es keine Hilfestellung. Die Proband*innen sollen hier die Form frei identifizieren. So soll sichergestellt werden, dass die Formen klar genug sind, dass sie auch ohne Hinweis oder Vorauswahl erkennbar sind. In Testschritt I.2-5 wird der **Kreis** und in Testschritt I.2-6 das **Quadrat** ausgesendet. Auch hier wurden zwei ähnliche Formen gewählt, von denen eine aus früheren Testschritten bekannt ist, um zu prüfen, ob sie eindeutig identifiziert und unterschieden werden können.

A.3.1.3 Testfall I.3: 3D-Formen erkennen

Dieser Testfall ist analog zu Testfall I.2 aufgebaut. Hier werden anstelle von 2D-Formen, die 3D-Formen, die in Abbildung A.2 zu sehen sind, überprüft.

In Testschritt I.3-1 wird die Form **Treppe** und in Testschritt I.3-2 die Form **Kugel** ausgesendet. Die beiden Formen wurden für den Start gewählt, um den Proband*innen ein Gefühl für die Haptik von den Ecken, Kanten und Kurven der

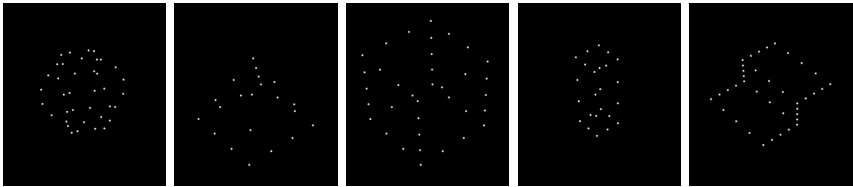


Abbildung A.2: Visualisierung der generierten 3D-Formen innerhalb der entwickelten Software.

Tabelle A.3: Aufbau Testfall I.3

Testschritt	Form	Hilfestellung
I.3-1	Treppe	Form bekannt
I.3-2	Kugel	Form bekannt
I.3-3	Quader	Wahl zwischen Quader und Kugel
I.3-4	Zylinder	Wahl zwischen Zylinder und Treppe
I.3-5	Treppe	keine
I.3-6	Pyramide	keine

3D-Formen zu vermitteln.

In Testschritt I.3-3 besteht die Wahl zwischen der Form *Quader* und der Form *Kugel*. Ausgesendet wird die Form **Quader**. In Testschritt I.3-4 besteht die Wahl zwischen den Formen *Zylinder* und *Treppe*. Ausgesendet wird die Form **Zylinder**. Durch diese Auswahl wird die Fähigkeit, verschiedene Ebenen zu ertasten untersucht.

In Testschritt I.3-5 wird die Form **Treppe** und in Testschritt I.3-6 die Form **Pyramide** ausgesendet, so wird getestet, ob komplexere Formen auch ohne Hilfestellung deutlich wahrgenommen werden können.

A.3.1.4 Testfall I.4: Feedback-Intensität bewerten

Das UPA kann mit verschiedenen Intensitäten betrieben werden. Die Intensität hängt von der Spannungsstärke ab, die in das UPA gespeist wird. Ziel dieses Testfalls ist es zu erheben, bei welchen Intensität die Nutzenden die Formen

identifizieren können. Im Testschritt I.4-1 wird eine 2D-Form und in Testschritt I.4-2 eine 3D-Form in jeweils 4 verschiedenen Intensitätsstufen (5 V, 10 V, 15 V und 20 V) ausgesendet und die Proband*innen haben die Möglichkeit Klarheit und Komfort zu bewerten.

A.4 Proband*innen der Evaluierung

A.4.1 Evaluierung Patient*innen-App und Dermatolog*innen-Dashboard

Tabelle A.4: Proband*innen für die Evaluierung der App (Runde 1)

Alter	Technikaffinität	Beruf
25-34	mittel	Sozialarbeiterin
25-34	hoch	Ingenieur
25-34	mittel	Bankkauffrau
25-34	sehr hoch	Doktorand Ingenieurwesen
25-34	sehr hoch	Doktorand Ingenieurwesen
25-34	gering	Kulturmanagerin
25-34	hoch	Ingenieur
35-50	hoch	Ingenieurin
>50	gering	Schulleiter
>50	mittel	Mathematiklehrerin

Tabelle A.5: Proband*innen für die Evaluierung der App (Runde 2)

Alter	Technikaffinität	Beruf
18-24	sehr hoch	Studentin Medizintechnik
18-24	hoch	Studentin Medizintechnik
18-24	hoch	Studentin Medizintechnik
25-34	sehr hoch	Doktorand Ingenieurwesen
25-34	sehr hoch	Doktorand Ingenieurwesen
25-34	sehr hoch	Arbeitsvorbereitung Bauunternehmen
25-34	hoch	Student Elektro- und Informationstechnik
35-50	mittel	Servicetechniker Medizingeräte
>50	mittel	Medizinische Fachangestellte
>50	gering	Postzusteller

Tabelle A.6: Proband*innen für die Evaluierung des Dashboards

Alter	Technikaffinität	Beruf
18-24	sehr hoch	Studentin Medizintechnik
18-24	hoch	Studentin Medizintechnik
18-24	hoch	Studentin Medizintechnik
25-34	sehr hoch	Doktorand Ingenieurwesen
25-34	sehr hoch	Doktorand Ingenieurwesen
25-34	hoch	Dermatologin
25-34	sehr hoch	Arbeitsvorbereitung Bauunternehmen
25-34	hoch	Student Elektro- und Informationstechnik
35-50	mittel	Dermatologin
35-50	mittel	Servicetechniker Medizingeräte
35-50	gering	Dermatologin
>50	mittel	Medizinische Fachangestellte
>50	gering	Postzusteller

Abbildungsverzeichnis

2.1	Online-PASI-Rechner für Dermatolog*innen [16]	7
2.2	Anteil der Körperregionen an der Körperoberfläche	8
2.3	Anordnung der Mechanorezeptoren in der Haut, aus [28] S. 642	11
3.1	Darstellung der Beziehungen zwischen den vorgestellten 3D-Rekonstruktionsverfahren	19
3.2	Ergebnisse der Feature Detection des SfM-Verfahrens	20
3.3	Ergebnisse des Feature Matching des SfM-Verfahrens	20
3.4	Ergebnis der Tiefenkarten-Berechnung im MVS-Verfahren	22
3.5	Rekonstruktionsprozess des PSR-Verfahrens [48]	23
3.6	Schematischer Aufbau eines Ultraschallwandlers	33
3.7	Veranschaulichung der Fokuspunktentstehung mit Ultraschall, basierend auf [72].	34
3.8	Ultraschall-Phased-Array und Fokuspunkt, basierend auf [73].	35
3.9	Visualisierung der verschiedenen Modulationsarten	37
3.10	Aufbau eines iterativen Entwicklungsprozesses nach ISO 9241-210, basierend auf [77]	39
3.11	Interpretation des SUS-Scores nach [84]	41
4.1	Diagnosegenauigkeit zwischen In-Person Diagnose und teledermatologischer Diagnose im Zeitverlauf [7, 8, 112–117, 119–124]	53
5.1	Asynchrones System als Kernkomponente im Konzept eines erweiterten teledermatologischen Gesamtsystems	73
5.2	Use-Case-Diagramm der Patient*innen-App	75
5.3	Erweiterung des Systems um eine Backend-Komponente für die Datenverarbeitung und Modellierung	76

5.4	Use-Case-Diagramm des Dermatolog*innen-Dashboards	80
5.5	Use-Case-Diagramm der visuellen 3D-Darstellung	81
5.6	Übersicht über die System-Komponenten	83
6.1	Farbschema von App und Dashboard	86
6.2	Workflow in der App bei der Datenaufnahme	88
6.3	Ergebnisse der Schritte 1 und 2 der Hintergrundentfernung	92
6.4	Ergebnisse von Schritt 3: Fallback-Segmentierung	93
6.5	Ansicht der Patientin Nina Niedlich im Dermatolog*innen-Dashboard	95
6.6	Optionen zur vergrößerten Ansicht der aufgenommenen Fotos im Dermatolog*innen-Dashboard	96
6.7	Patient*innen-Übersicht im Dermatolog*innen-Dashboard	97
7.1	Pipeline des 3D-Modellierungsprozesses	100
7.2	Ergebnis des SfM-Verfahrens mit in Rot dargestellten Kameraparameter	102
7.3	Ergebnis des MVS-Verfahrens	102
7.4	Ergebnis der 3D-Modellierung mit PSR	104
7.5	Ergebnis der 3D-Modellierung mit NeRF	104
7.6	Ergebnis der 3D-Modellierung mit Gaussian Splatting	105
7.7	Auswahl eines 3D-Modells zur Ansicht im Dashboard	107
7.8	Ansicht eines 3D-Modells nach Auswahl im Dashboard	108
8.1	UPA Prototyp	112
8.2	Schematischer Aufbau des SonicSurface, basierend auf [132]	113
8.3	3D-Ausgabesystem erweitert um eine Handtracking-Kamera	116
8.4	Design des UPA-Gehäuses mit Kamerahalterung	117
8.5	UPA mit Handtracking-Kamera im Gehäuse	117
8.6	Komponentendiagramm der Software	121
8.7	Flussdiagramm der Funktion <code>calc_phases()</code>	123
8.8	Veranschaulichung der Filterung der Fokuspunkte durch <code>filter_points()</code>	124
8.9	Hauptfenster des entwickelten Programms Ultrasonic Haptics	125
8.10	Menü-Reiter der Bedienoberfläche	127
8.11	Ultrasonic Haptics-Anwendung mit ausgewähltem Hautmodell	128

8.12	3D-Visualisierung mit Standard-Feedback (links) und Handtracking-Feedback (rechts)	128
8.13	Auswahl des 3D-Modells in der Patient*innen-Ansicht	129
9.1	Ergebnisse der Verfahren zur 3D-Modellierung	132
9.2	Bewertung der Merkmale der 3D-Modelle	135
9.3	Bewertung der Diagnoseeignung der 3D-Modelle	137
9.4	Ergebnisse der Nutzbarkeitsbewertung der visuellen 3D-Darstellung nach [84]	138
9.5	SUS-Scores der drei Testrunden für die haptische 3D-Darstellung . .	145
9.6	SUS-Scores der beiden Testrunden für die Patient*innen-App nach [84]	148
9.7	SUS-Score für das Dermatolog*innen-Dashboard nach [84]	149
A.1	Visualisierung der generierten 2D-Formen innerhalb der entwickelten Software.	187
A.2	Visualisierung der generierten 3D-Formen innerhalb der entwickelten Software.	188

Tabellenverzeichnis

- 2.1 Klassifikation der Mechanorezeptoren (nach [26,29]) 13

- 5.1 Persona Ingenieurin Ina 62
- 5.2 Persona Alleinerziehender Vater Alex 62
- 5.3 Persona Studentin Sarah 63
- 5.4 Persona niedergelassene Dermatologin Nadja 63
- 5.5 Persona Klinikärztin Katja 64
- 5.6 Persona Assistenzarzt Andreas 64
- 5.7 Anforderungen an die Patient*innen-App 69
- 5.8 Anforderungen an das Dermatolog*innen-Dashboard 70
- 5.9 Anforderungen an die 3D-Modell-Erstellung 71
- 5.10 Anforderungen an die visuelle 3D-Darstellung 71
- 5.11 Anforderungen an die haptische 3D-Darstellung 72
- 5.12 Eingabe- und Ausgabedaten der App 75
- 5.13 Eingabe- und Ausgabedaten des Backends 78
- 5.14 Eingabe- und Ausgabedaten des Dashboards 79
- 5.15 Eingabe- und Ausgabedaten der visuellen 3D-Darstellung 81
- 5.16 Eingabe- und Ausgabedaten der haptischen 3D-Darstellung 82

- 8.1 Bauteilliste des SonicSurface. 113
- 8.2 Vergleich ausgewählter Programmiersprachen hinsichtlich ihrer
Eignung für die geplante Anwendung, basierend auf [134–137] 120

- 9.1 Vergleich der Ähnlichkeits- und Performanzwerte der
verschiedenen Verfahren 132
- 9.2 Statistische Kennwerte zur Bewertung der 3D-Modell-Merkmale . . . 136
- 9.3 Statistische Kennwerte zur Bewertung der Diagnoseeignung der
3D-Modelle 136

9.4	Ablauf Phase I	139
9.5	Testergebnisse der 1.Testrunde: SonicSurface UPA mit OpenSource-Software	140
9.6	Testergebnisse der 2.Testrunde: Erweitertes UPA mit eigener Software (Verbesserungen zu Testrunde I grün hinterlegt)	142
9.7	Testergebnisse der 3.Testrunde: Erweitertes UPA mit Handtracking, Kennzeichnung der Verbesserungen (grün) und Verschlechterungen (rot) zu Testrunde 2	143
9.8	Erfüllungsgrad der Anforderungen an die Patient*innen-App	150
9.9	Erfüllungsgrad der Anforderungen an das Dermatolog*innen-Dashboard	151
9.10	Erfüllungsgrad der Anforderungen an die 3D-Modell-Erstellung	152
9.11	Erfüllungsgrad der Anforderungen an die visuelle 3D-Darstellung	153
9.12	Erfüllungsgrad der Anforderungen an die haptische 3D-Darstellung	154
A.1	Ergebnisse von Studien zur Diagnosegenauigkeit in der Teledermatologie	183
A.1	Ergebnisse von Studien zur Diagnosegenauigkeit in der Teledermatologie (Fortsetzung)	184
A.1	Ergebnisse von Studien zur Diagnosegenauigkeit in der Teledermatologie (Fortsetzung)	185
A.2	Aufbau Testfall I.2	187
A.3	Aufbau Testfall I.3	188
A.4	Proband*innen für die Evaluierung der App (Runde 1)	190
A.5	Proband*innen für die Evaluierung der App (Runde 2)	191
A.6	Proband*innen für die Evaluierung des Dashboards	191

Eigene Veröffentlichungen

- [LS1] L. Schweickart, C. Erler, J. Juhl, C. Zimmermann, und W. Stork, „User-centered representation of data flows in mHealth applications,” in *2023 International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE)*, 2023.
- [LS2] L. Schweickart, L. Uschakow, J. Hofmann, C. Zimmermann, A. Schmieder, und W. Stork, „Potentials of a Tactile Interface for Diagnostic Support in Dermatological Telemedicine,” in *2024 4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, 2024.
- [LS3] O. Werthwein, D. J. Bukieda, L. Schweickart, und W. Stork, „Pose-based Hand Movement Tracking for Monitoring Psoriatic Arthritis Progression,” in *11th World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Sciences (EECSS'25)*, 2025.
- [LS4] D. Birkenmaier, X. Wu, L. Schweickart, und W. Stork, „Towards Using the Yerkes-Dodson Law to Select Optimal Training Difficulty in Firefighter Simulations: A Machine Learning Based ECG Approach,” in *11th World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Sciences (EECSS'25)*, 2025.
- [LS5] L. Schweickart, J. Hofmann, J. M. Hustiak, C. Zimmermann, P. Schöppe, A. Schmieder, und W. Stork, „Comparing 3D-Modeling Algorithms to Enhance Remote Diagnosis Accuracy of Psoriasis,” in *11th World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Sciences (EECSS'25)*, 2025.

- [LS6] A. Koopmann, A. M. Pfeifer, L. Schweickart, N. Biniaminov, V. Haas, P. Marquardt, A. Gößwein, C. Czaban, S. Biniaminov, M. Blauth, C. Glatzel, C. Zimmermann, W. Stork, V. Olsavszky, und A. Schmieder, „Nutzen der partizipatorischen Mitwirkung von PatientInnen an der Entwicklung einer dermatologischen Therapie-App – ein Bericht aus der Praxis,” *Die Dermatologie*, Vol. 75, S. 562–565, 2024.
- [LS7] J. Hofmann, L. Schweickart, C. Zimmermann, M. Li, J. Below, A. Schmieder, J. Leipe, V. Olsavszky, I. Bychkova, und W. Stork, „Perfusion Analysis for Telemedical Long-Term Monitoring of Patients with Chronic Skin Diseases,” in *2025 6th International Conference in Electronic Engineering Information Technology (EEITE)*, 2025.
- [LS8] L. Schweickart, „P192 Das Potenzial von taktilen Interfaces zur Verbesserung der Fern-Diagnose in der Teledermatologie mit Schwerpunkt Psoriasis,” Poster Abstract, 2025.

Betreute Abschlussarbeiten

- [TH1] P. Theuer, „Improving Access to Dermatological Care: Design and Development of a Smartphone Application for Psoriasis Patients,” Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2023.
- [TH2] I. Zell, „Konzeption und Entwicklung eines benutzerfreundlichen Dashboards im Kontext der Teledermatologie,” Bachelorarbeit, Technische Hochschule Mannheim, 2025.
- [TH3] J. Below, „Analysis of a perfusion signal as part of an AI-based monitoring app for patients with chronic skin diseases,” Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2024.
- [TH4] L. Schoch, „Konzept und Umsetzung einer Ansteuerung für taktile Interfaces im Kontext der Teledermatologie,” Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2025.
- [TH5] L. Uschakow, „Entwicklung und Validierung eines Testkonzepts für ein taktiles Interface zum Fühlbarmachen der Haut am Beispiel eines Ultraschallboards zur Behandlung von Psoriasis und Dermatitis,” Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2024.
- [TH6] D. Beyer, „Evaluation von Methoden der Künstlichen Intelligenz zur Erkennung von Gewalt in Videos,” Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2023.
- [TH7] J. M. Hustiak, „Untersuchung von 3D-Modellierungsalgorithmen für Hautabschnitte in der Telemedizin,” Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2024.

- [TH8] M. Saribok, „Fortentwicklung eines Virtual Reality (VR) Handschuhs für ein Taktils Interface in einer VR-Umgebung,” Masterarbeit, Wilhelm Büchner Hochschule, 2025.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Xiong, T. Xue, M. Tong, L. Xu, und B. Bai, „Dynamic trend analysis of global psoriasis burden from 1990 to 2021: a study of gender, age, and regional differences based on GBD 2021 data,” *Frontiers in Public Health*, Vol. 13, 2025.
- [2] C. Sun, X. Zhang, Z. Su, W.-H. Yao, H.-D. Chen, und Y.-P. Zeng, „Global, regional, and national burdens of atopic dermatitis from 1990 to 2021: A trend analysis from the Global Burden of Disease Study 2021,” *Journal of the American Academy of Dermatology*, Vol. 93, Nr. 4, S. 1008–1017, 2025.
- [3] OECD/European Commission, „Health at a Glance: Europe 2024: State of Health in the EU Cycle,” 2024.
- [4] J. J. Lee und J. C. English 3rd., „Teledermatology: a review and update,” *American Journal of Clinical Dermatology*, Vol. 19, S. 253–260, 2018.
- [5] E. M. Warshaw, Y. J. Hillman, N. L. Greer, E. M. Hagel, R. MacDonald, I. Rutks, und T. J. Wilt, „Teledermatology for Diagnosis and Management of Skin Conditions: A Systematic Review of the Evidence,” *Journal of the American Academy of Dermatology*, Vol. 64, Nr. 4, S. 759–772, 2010.
- [6] M. L. O. Demo, D. H. Nunes, und C. E. M. Marcon, „Psoriasis in Tele-dermatology: Analysis of the 2016–2020 Period in Santa Catarina,” *Anais Brasileiros de Dermatologia*, Vol. 98, Nr. 1, S. 47–58, 2023.
- [7] N. Nami, C. Massone, P. Rubegni, G. Cevenini, M. Fimiani, und R. Hofmann-Wellenhof, „Concordance and Time Estimation of Store-and-Forward Mobile

- Teledermatology Compared to Classical Face-to-Face Consultation,” *Acta dermato-venereologica*, Vol. 95, Nr. 1, S. 35–39, 2014.
- [8] K. Edison, D. Ward, J. Dyer, W. Lane, L. Chance, und L. Hicks, „Diagnosis, Diagnostic Confidence, and Management Concordance in Live-Interactive and Store-and-Forward Teledermatology Compared to In-Person Examination,” *Telemedicine journal and e-health : the official journal of the American Telemedicine Association*, Vol. 14, Nr. 9, S. 889–895, 2008.
- [9] World Health Organization, „Global report on psoriasis,” Geneva, WHO report, 2016.
- [10] R. G. B. Langley, G. G. Krueger, und C. E. M. Griffiths, „Psoriasis: Epidemiology, Clinical Features, and Quality of Life,” *Annals of the Rheumatic Diseases*, Vol. 64, Nr. suppl 2, S. ii18–ii23, 2005.
- [11] M. Furue, K. Furue, G. Tsuji, und T. Nakahara, „Interleukin-17A and Keratinocytes in Psoriasis,” *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 21, Nr. 4, 2020.
- [12] A. Rendon und K. Schäkel, „Psoriasis Pathogenesis and Treatment,” *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 20, Nr. 6, S. 1475, 2019.
- [13] J. M. Martínez-Ortega, P. Nogueras, J. E. Muñoz-Negro, L. Gutiérrez-Rojas, P. González-Domenech, und M. Gurpegui, „Quality of life, anxiety and depressive symptoms in patients with psoriasis: A case-control study,” *Journal of Psychosomatic Research*, Vol. 124, 2019.
- [14] M. K. Kowalska, S. M. Orłowska, Bednarczyk, J. E. Majewska, und W. Hu-decka, „Pathogenesis of Psoriasis vulgaris and Current Management and Therapeutic Strategies Including the Role of Emollients—A Review of the Current Literature,” *Applied Sciences*, Vol. 15, Nr. 12, 2025.
- [15] Y. Manchanda, A. De, S. Das, und D. Chakraborty, „Disease Assessment in Psoriasis,” *Indian Journal of Dermatology*, Vol. 68, Nr. 3, S. 278–281, 2023.

- [16] M. Corti und M. Corti, „Psoriasis Area Severity Index (PASI) Calculator,” 2019, Zuletzt aufgerufen: 31.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://pasi.corti.li/>
- [17] B. Ramsay und C. M. Lawrence, „Measurement of involved surface area in patients with psoriasis,” *British Journal of Dermatology*, Vol. 124, Nr. 6, S. 565–570, 1991.
- [18] A. Y. Finlay und G. K. Khan, „Dermatology Life Quality Index (DLQI)—a simple practical measure for routine clinical use,” *Clinical and Experimental Dermatology*, Vol. 19, Nr. 3, S. 210–216, 1994.
- [19] M. Basra, R. Fenech, R. Gatt, S. Salek, und A. Finlay, „The Dermatology Life Quality Index 1994–2007: a comprehensive review of validation data and clinical results,” *The British journal of dermatology*, Vol. 159, Nr. 5, S. 997–1035, 2008.
- [20] Y. Hongbo, C. Thomas, M. Harrison, S. Salek, und A. Finlay, „Translating the Science of Quality of Life into Practice: What Do Dermatology Life Quality Index Scores Mean?” *The Journal of investigative dermatology*, Vol. 125, Nr. 4, S. 659–664, 2005.
- [21] Deutsche Dermatologische Gesellschaft (DDG), „S3-Leitlinie „Therapie der Psoriasis vulgaris“,“ Berlin, Germany, Leitlinienreport AWMF-Registernummer 013-001, 2025, Stand 23.07.2025, gültig bis 22.07.2030.
- [22] J. Fleißner, C. Herz, A.-L. Riedmiller-Schraven, H. Hamm, und M. Goebeler, „Weitere entzündliche Dermatosen,” in *Basiswissen Dermatologie*, M. Goebeler und H. Hamm, Hrsgg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024, S. 109–135.
- [23] C. Claes, W. Kulp, W. Greiner, J.-M. G. von der Schulenburg, und T. Werfel, „Therapie der mittelschweren und schweren Psoriasis,” Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information (DIMDI), Köln, Deutschland, HTA-Bericht 34, 2006.

- [24] U. Mrowietz, K. Kragballe, K. Reich, P. Spuls, C. E. Griffiths, A. Nast, J. Franke, C. Antoniou, P. Arenberger, F. Balieva, M. Bylaite *et al.*, „Definition of treatment goals for moderate to severe psoriasis: a European consensus,” *Archives of Dermatological Research*, Vol. 303, Nr. 1, S. 1–10, 2011.
- [25] T. A. Kern, *Entwicklung haptischer Geräte: Ein Einstieg für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [26] E. R. Kandel, J. D. Koester, S. H. Mack, und S. A. Siegelbaum, *Principles of Neural Science*, 6. Aufl. New York: McGraw Hill, 2021.
- [27] E. B. Goldstein, L. Cacciamani, und K. R. Gegenfurtner, *Wahrnehmungspsychologie*, 10. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2023.
- [28] A. Feigenspan, *Prinzipien der Physiologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2017.
- [29] R. S. Johansson und A. B. Vallbo, „Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin,” *The Journal of Physiology*, Vol. 286, S. 283–300, 1979.
- [30] R. W. Van Boven und K. O. Johnson, „The Limit of Tactile Spatial Resolution in Humans: Grating Orientation Discrimination at the Lip, Tongue, and Finger,” *Neurology*, Vol. 44, Nr. 12, S. 2361–2366, 1994.
- [31] M. L. McHugh, „Interrater reliability: the kappa statistic,” *Biochemia Medica*, Vol. 22, Nr. 3, S. 276–282, 2012.
- [32] P. D. Fabricant, „Interrater and Intrarater Reliability Studies,” in *Practical Clinical Research Design and Application: A Primer for Physicians, Surgeons, and Clinical Healthcare Professionals*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, S. 89–95.
- [33] J. Cohen, „A Coefficient of Agreement for Nominal Scales,” *Educational and Psychological Measurement*, Vol. 20, S. 37–46, 1960.
- [34] R. Klar und H. Schicha, „Sensitivität, Spezifität und Prädiktiver Wert als Beurteilungshilfen für die Qualität der Klinischen Routinediagnostik,” in

- Qualitätssicherung in der Medizin, Probleme und Lösungsansätze*, H.-K. Selbmann, F. W. Schwartz, und W. van Eimeren, Hrsgg. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981, S. 150–159.
- [35] H. Faller, „Sensitivity, specificity, positive and negative predictive value,” *Die Rehabilitation*, Vol. 44, Nr. 1, S. 44–49, 2005.
- [36] A. M. Snyder, S. C. Chen, M. M. Chren, L. K. Ferris, L. D. Edwards, R. A. Swerlick, N. D. Flint, A. M. Cizik, R. Hess, J. Kean, A. M. Secrest, und Dermatology PRO Consortium, „Patient-Reported Outcome Measures and Their Clinical Applications in Dermatology,” *American Journal of Clinical Dermatology*, Vol. 24, Nr. 4, S. 499–511, 2023.
- [37] K. Churrua, C. Pomare, L. A. Ellis, J. C. Long, S. B. Henderson, L. E. D. Murphy, C. J. Leahy, und J. Braithwaite, „Patient-reported outcome measures (PROMs): A review of generic and condition-specific measures and a discussion of trends and issues,” *Health Expectations: an international journal of public participation in health care and health policy*, Vol. 24, Nr. 4, S. 1015–1024, 2021.
- [38] Y. Aloimonos und A. Rosenfeld, „Computer vision,” *Science*, Vol. 253, Nr. 5025, S. 1249–1254, 1991.
- [39] H. Süße und E. Rodner, „3D-Rekonstruktion,” in *Bildverarbeitung und Objekterkennung: Computer Vision in Industrie und Medizin*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 363–414.
- [40] J. L. Schönberger und J.-M. Frahm, „Structure-from-Motion Revisited,” in *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, S. 4104–4113.
- [41] O. Özyeşil, V. Voroninski, R. Basri, und A. Singer, „A Survey on Structure from Motion,” *Acta Numerica*, Vol. 26, S. 305–364, 2017.
- [42] M. A. Fischler und R. C. Bolles, „Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography,” *Communications of the ACM*, Vol. 24, Nr. 6, S. 381–395, 1981.

- [43] V. Lepetit, F. Moreno-Noguer, und P. Fua, „EPnP: An Accurate $O(n)$ Solution to the PnP Problem,” *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, Vol. 81, S. 155–166, 2009.
- [44] J. L. Schönberger, „Robust Methods for Accurate and Efficient 3D Modeling from Unstructured Imagery,” Ph.D. dissertation, ETH Zürich, 2018.
- [45] Y. Furukawa und C. Hernández, „Multi-View Stereo: A Tutorial,” *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, Vol. 9, Nr. 1–2, S. 1–148, 2015.
- [46] M. Kazhdan, M. Bolitho, und H. Hoppe, „Poisson Surface Reconstruction,” *Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing (SGP)*, S. 61–70, 2006.
- [47] W. E. Lorensen und H. E. Cline, „Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm,” *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 21, Nr. 4, S. 163–169, 1987.
- [48] M. Kazhdan und H. Hoppe, „Screened Poisson surface reconstruction,” *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, S. 1–13, 2013.
- [49] B. Mildenhall, P. P. Srinivasan, M. Tancik, J. T. Barron, R. Ramamoorthi, und R. Ng, „NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis,” in *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2020, S. 210–225.
- [50] B. Kerbl, G. Kopanas, T. Leimkühler, und G. Drettakis, „3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering,” *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 42, Nr. 4, S. 1–14, 2023.
- [51] G. Chen und W. Wang, „A Survey on 3D Gaussian Splatting,” *arXiv preprint arXiv:2401.03890*, 2024. [Online]. Verfügbar: <https://arxiv.org/abs/2401.03890>
- [52] A. C. Bovik, *Handbook of Image and Video Processing*, 1. Aufl. San Diego, CA: Academic Press, 2000.

- [53] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, und E. P. Simoncelli, „Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity,” *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 13, Nr. 4, S. 600–612, 2004.
- [54] R. Zhang, P. Isola, A. A. Efros, E. Shechtman, und O. Wang, „The Unreasonable Effectiveness of Deep Features as a Perceptual Metric,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2018, S. 586–595.
- [55] J. Reynolds, C. K. Nagesh, und D. Gurari, „Salient Object Detection for Images Taken by People With Vision Impairments,” in *2024 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2024, S. 8507–8516.
- [56] T. Kim, K. Kim, J. S. Lee, D. J. Cha, J.-H. Lee, und D. Kim, „Revisiting Image Pyramid Structure for High Resolution Salient Object Detection,” in *Asian Conference on Computer Vision*, 2022.
- [57] B. Jähne, „Segmentierung,” in *Digitale Bildverarbeitung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [58] N. Otsu, „A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, Nr. 1, S. 62–66, 1979.
- [59] „Color image segmentation: advances and prospects,” *Pattern Recognition*, Vol. 34, Nr. 12, S. 2259–2281, 2001.
- [60] B. Jähne, „Kanten,” in *Digitale Bildverarbeitung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [61] S. Xie und Z. Tu, „Holistically-Nested Edge Detection,” in *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, S. 1395–1403.
- [62] T. G. Leighton, „What is ultrasound?” *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, Vol. 93, S. 3–83, 2007.

- [63] R. Alkins und K. Hynynen, „Ultrasound Therapy,” in *Comprehensive Biomedical Physics*, A. Brahme, Hrsg., Vol. 10. Oxford: Elsevier, 2014, S. 153–168.
- [64] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, und H. Shinoda, „Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound,” *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, Nr. 3, S. 155–165, 2010.
- [65] K. Hasegawa und H. Shinoda, „Aerial Vibrotactile Display Based on Multi-unit Ultrasound Phased Array,” Vol. 11, Nr. 3, S. 367–377, 2018.
- [66] T. Iwamoto, M. Tatzono, und H. Shinoda, „Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound,” in *Haptics: Perception, Devices and Scenarios*, M. Ferre, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, S. 504–513.
- [67] T. Togawa, T. Tamura, und P. Öberg, *Biomedical transducers and instruments*. Boca Raton: CRC press.
- [68] L. Stiny und M. Poppe, *Grundwissen Elektrotechnik und Elektronik: Eine leicht verständliche Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024.
- [69] C. Koch, *Ultraschall in Medizin und Technik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 1–29.
- [70] L. W. Schmerr Jr., *Fundamentals of Ultrasonic Phased Arrays*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [71] J. Li, Y. Ma, T. Zhang, K. K. Shung, und B. Zhu, „Recent Advancements in Ultrasound Transducer: From Material Strategies to Biomedical Applications,” *BME Frontiers*, 2022.
- [72] I. Rakkolainen, E. Freeman, A. Sand, R. Raisamo, und S. Brewster, „A Survey of Mid-Air Ultrasound Haptics and Its Applications,” *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, Nr. 1, S. 2–19, 2020.

- [73] J. Chen, F. Yu, Z. Wang, und L. Lin, „Multichannel Ultrasound Focusing Delay Control Method Based on Variable-Length Shift Register for Airborne Ultrasound Tactile Feedback,” *IEEE Access*, Vol. 8, S. 24 904–24 913, 2020.
- [74] P. Xiong, Q. Wei, und J. Zhang, „Rendering of Visual Roughness Using Ultrasound Phased Array,” in *2022 6th International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR)*, 2022, S. 242–246.
- [75] R. Takahashi, K. Hasegawa, und H. Shinoda, „Lateral Modulation of Midair Ultrasound Focus for Intensified Vibrotactile Stimuli,” in *Haptics: Science, Technology, and Applications*, D. Prattichizzo, H. Shinoda, H. Z. Tan, E. Ruffaldi, und A. Frisoli, Hrsgg. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 276–288.
- [76] W. Frier, D. Ablart, J. Chilles, B. Long, M. Giordano, M. Obrist, und S. Subramanian, „Using Spatiotemporal Modulation to Draw Tactile Patterns in Mid-Air,” in *Haptics: Science, Technology, and Applications*, D. Prattichizzo, H. Shinoda, H. Tan, E. Ruffaldi, und A. Frisoli, Hrsgg. Springer International Publishing, 2018, S. 270–281.
- [77] *DIN EN ISO 9241-210: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2019); Deutsche Fassung EN ISO 9241-210:2019*, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) Standard DIN EN ISO 9241-210:2019, 2019, ISO 9241-210:2019.
- [78] D. A. Norman und S. W. Draper, Hrsgg., *User Centered System Design: New Perspectives on Human-Computer Interaction*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1985.
- [79] J. Pruitt und J. Grudin, „Personas: practice and theory,” in *Proceedings of the 2003 Conference on Designing for User Experiences*, Serie DUX '03. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2003, S. 1–15.
- [80] M. Cohn, *User Stories Applied: For Agile Software Development*. Boston, MA: Addison-Wesley Professional, 2004.

- [81] S. Iwarsson und A. Ståhl, „Accessibility, usability and universal design—positioning and definition of concepts describing person–environment relationships,” *Disability and Rehabilitation*, Vol. 25, Nr. 2, S. 57–66, 2003.
- [82] C. Barnes, „Understanding disability and the importance of design for all,” *Journal of Accessibility and Design for All*, Vol. 1, Nr. 1, S. 55–80, 2011.
- [83] J. Brooke, „SUS – a quick and dirty usability scale,” in *Usability Evaluation in industry*, P. Jordan, B. Thomas, B. Weerdmeester, und I. L. McClelland, Hrsgg., 1996.
- [84] ———, „SUS: a retrospective,” *Journal of Usability Studies*, Vol. 8, Nr. 2, S. 29–40, 2013.
- [85] M. Augustin, J. Wimmer, T. Biedermann, R. Blaga, C. Dierks, V. Djamei, A. Elmer, P. Elsner, A. Enk, S. Gass, M. Henningsen, R. Hofman-Wellenhof, R. von Kiedrowski, H.-D. Kunz, C. Liebram, A. Navarini, M. Otten, M. Reusch, C. Schüller, A. Zink, und K. Strömer, „Praxis der Teledermatologie,” *JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft*, Vol. 16, S. 6–57, 2018.
- [86] F. Kaliyadan und M. L. Ramsey, *Teledermatology*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2022.
- [87] L. Verma, T. Turk, L. Dennett, und M. Dytoc, „Teledermatology in Atopic Dermatitis: A Systematic Review,” *Journal of cutaneous medicine and surgery*, Vol. 28, Nr. 2, S. 153–157, 2024.
- [88] I. De la Torre Díez, M. López-Coronado, C. Vaca, J. Saez Aguado, und C. De Castro, „Cost-Utility and Cost-Effectiveness Studies of Telemedicine, Electronic, and Mobile Health Systems in the Literature: A Systematic Review,” *Telemedicine and e-Health*, Vol. 21, S. 81–85, 2015.
- [89] R. Wootton, „Twenty years of telemedicine in chronic disease management—An evidence synthesis,” *Journal of telemedicine and telecare*, Vol. 18, Nr. 4, S. 211–220, 2012.

- [90] H. Kornmehl, S. Singh, M. Johnson, und A. Armstrong, „Direct-Access Online Care for the Management of Atopic Dermatitis: A Randomized Clinical Trial Examining Patient Quality of Life,” *Telemedicine and e-Health*, Vol. 23, Nr. 9, S. 726–732, 2017.
- [91] T. J. Brinker, A. Hekler, C. von Kalle, D. Schadendorf, S. Esser, C. Berking, M. T. Zacher, W. Sondermann, N. Grabe, T. Steeb, J. S. Utikal, L. E. French, und A. H. Enk, „Teledermatology: Comparison of Store-and-Forward and Live Video Conferencing,” *Journal of medical Internet research*, Vol. 20, Nr. 10, 2018.
- [92] J. Beer, E. Hadeler, A. Calume, H. Gitlow, und K. Nouri, „Teledermatology: current indications and considerations for future use,” *Archives of dermatological research*, Vol. 313, Nr. 1, S. 11–15, 2021.
- [93] M. Sonnet, „Dermatologe: Digitale Medizin wird mit Vehemenz kommen,” *Ärzte Zeitung*, 2024.
- [94] BfArM, „Verzeichnis digitaler Gesundheitsanwendungen (DiGA),” 2024, Zuletzt aufgerufen: 18.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://diga.bfarm.de>
- [95] Nia Health GmbH, „Die Neurodermitis-App für mehr Wohlbefinden,” Zuletzt aufgerufen: 18.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://www.nia-health.de/>
- [96] MetaOptima Technology Inc., „Die weltweit intelligenteste Dermatologie-Plattform,” Zuletzt aufgerufen: 18.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://www.dermengine.com/de/>
- [97] eDerma UG, „Ihr Partner für Teledermatologie,” Zuletzt aufgerufen: 18.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://www.e-derma.de/>
- [98] derma2go Deutschland GmbH, „Ihr Online Hautarzt ohne Termin und Wartezeit,” Zuletzt aufgerufen: 18.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://www.derma2go.com/de/>

- [99] KinDermaGmbH, „Deine Online-Hautarztpraxis für Kinder Jugendliche,” 2022, Zuletzt aufgerufen: 18.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://www.little-skindoctor.de/>
- [100] Apple App Store, „Dermanostic app,” 2023, Zuletzt aufgerufen: 18.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://apps.apple.com/ch/app/dermanostic-hautarzt-per-app/id1504110923?l=en>
- [101] A. Lucieri, „SkinDoc: Erklärbare KI für die Teledermatologie,” *dfki ai next*, 2025, Zuletzt aufgerufen: 18.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://www.dfki.de/web/news/skindoc-erklaerbare-ki-fuer-die-teledermatologie>
- [102] Smart Health Heidelberg GmbH, „Online Hautarzt,” Zuletzt aufgerufen: 18.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://online-hautarzt.net/>
- [103] Nia Health GmbH, „Sorea | Die Psoriasis App,” Zuletzt aufgerufen: 18.05.2025. [Online]. Verfügbar: <https://www.sorea-health.de/>
- [104] S. M. Banu und G. Toacse, „A mobile/desktop medical application for automatic differential diagnosis of psoriasis lesion,” in *2013 Second International Conference on E-Learning and E-Technologies in Education (ICEEE)*. IEEE, 2013, S. 186–191.
- [105] R. Pangti, J. Mathur, V. Chouhan, S. Kumar, L. Rajput, S. Shah, A. Gupta, A. Dixit, D. Dholakia, S. Gupta, S. Gupta, M. George, V. Sharma, und S. Gupta, „A machine learning-based, decision support, mobile phone application for diagnosis of common dermatological disease,” *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, Vol. 35, Nr. 2, S. 536–545, 2021.
- [106] B. Trettin, D. Danbjørg, F. Andersen, S. Feldman, und H. Agerskov, „Development of an mHealth app for patients with psoriasis undergoing biological treatment: participatory design study,” *JMIR Dermatology*, Vol. 4, Nr. 1, S. e26673, 2021.

- [107] A. Havelin und P. Hampton, „Telemedicine and e-Health in the Management of Psoriasis: Improving Patient Outcomes—A Narrative Review,” *Psoriasis: Targets and Therapy*, Vol. 12, S. 15–24, 2022.
- [108] D. Moreno-Ramirez, J. Herrerías-Esteban, T. Ojeda, J. Carrascosa, G. Carretero, P. de la Cueva, C. Ferrándiz, M. Galán, R. Rivera, L. Rodríguez-Fernández, R. Ruiz-Villaverde, und L. Ferrándiz, „Reliability of the MDi Psoriasis® Application to Aid Therapeutic Decision-Making in Psoriasis,” *Actas dermo-sifiliograficas*, Vol. 108, Nr. 7, S. 650–656, 2017.
- [109] S. Wongvibulsin, M. J. Yan, V. Pahalyants, W. Murphy, R. Daneshjou, und V. Rotemberg, „Current State of Dermatology Mobile Applications With Artificial Intelligence Features,” *JAMA Dermatology*, Vol. 160, Nr. 6, S. 646–650, 2024.
- [110] M. D. Sun, J. Kentley, P. Mehta, S. Dusza, A. C. Halpern, und V. Rotemberg, „Accuracy of commercially available smartphone applications for the detection of melanoma,” *The British Journal of Dermatology*, Vol. 186, Nr. 4, S. 744–746, 2022.
- [111] A. Masud, S. Shafi, und B. K. Rao, „Mobile medical apps for patient education: a graded review of available dermatology apps,” *Cutis*, Vol. 101, Nr. 2, S. 141–144, 2018.
- [112] M. O. Oztas, E. Calikoglu, K. Baz *et al.*, „Reliability of Web-based tele-dermatology consultations,” *Journal of Telemedicine and Telecare*, Vol. 10, Nr. 1, S. 25–28, 2004.
- [113] S. Saade, D. Khoury, W. Shahla, C. Stephan, N. Charbel, R. Joukhdar, M. Bejjani, M. Bekdache, S. Mansour, und D. Saade, „Teledermatology Diagnostic Accuracy: A Randomized Cohort Study Comparing Three Image Acquisition Techniques,” *International journal of telemedicine and applications*, 2025.

- [114] N. Patel, N. Aboukhatwah, und B. Esdaile, „Effectiveness and diagnostic accuracy of teledermatology for the assessment of skin conditions,” *The Australasian journal of dermatology*, Vol. 65, Nr. 4, S. 342–349, 2024.
- [115] E. Clarke, J. Reichenberg, A. Ahmed, B. Keeling, J. Custer, P. Rathouz, und A. Jambusaria-Pahlajani, „The utility of teledermatology in the evaluation of skin lesions,” *Journal of telemedicine and telecare*, Vol. 29, Nr. 5, S. 382–389, 2023.
- [116] M. Giavina-Bianchi, P. Giavina-Bianchi, A. Santos, L. Rizzo, und E. Cordioli, „Accuracy and efficiency of telemedicine in atopic dermatitis,” *JAAD International*, Vol. 1, S. 175–181, 2020.
- [117] M. Giavina-Bianchi, R. Sousa, und E. Cordioli, „Part I: Accuracy of Teledermatology in Inflammatory Dermatoses,” *Frontiers in Medicine (Lausanne)*, 2020.
- [118] G. Artın, C. Şahin, E. Yazıcı, B. Tuğrul, A. Güner, H. Göğebakan, A. Gencer, und H. Tuğsal, „Evaluation of the Diagnostic Accuracy of Teledermatology for Skin Lesions in Patients with Inflammatory Rheumatic Diseases,” 2024, Preprint, available at <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3959869/v1>.
- [119] P. Singh, P. Soyer, J. Wu, W. Salmhofer, und S. Gilmore, „Tele-assessment of Psoriasis Area and Severity Index: A study of the accuracy of digital image capture,” *The Australasian journal of dermatology*, Vol. 52, Nr. 4, S. 259–263, 2011.
- [120] N. Lasierra, A. Alesanco, Y. Gilaberte, R. Magallón, und J. García, „Lessons learned after a three-year store and forward teledermatology experience using internet: Strengths and limitations,” *International journal of medical informatics*, Vol. 81, Nr. 5, S. 332–343, 2012.
- [121] V. A. Heffner, V. B. Lyon, D. C. Brousseau, K. E. Holland, und K. Yen, „Store-and-forward teledermatology versus in-person visits: A comparison in pediatric teledermatology clinic,” *Journal of the American Academy of Dermatology*, Vol. 60, Nr. 6, S. 956–961, 2009.

- [122] R. Marchell, C. Locatis, G. Burges, R. Maisiak, W.-L. Liu, und M. Ackerman, „Comparing High Definition Live Interactive and Store-and-Forward Consultations to In-Person Examinations,” *Telemedicine and e-Health*, Vol. 23, S. 213–218, 2017.
- [123] D. O’Connor, O. Jew, M. Perman, L. Castelo-Soccio, F. Winston, und P. McMahon, „Diagnostic Accuracy of Pediatric Teledermatology Using Parent-Submitted Photographs: A Randomized Clinical Trial,” *JAMA Dermatology*, Vol. 153, S. 1243–1248, 2017.
- [124] C. Gerhardt, R. Foels, S. Grewe, und B. Baldwin, „Assessing the Diagnostic Accuracy of Teledermatology Consultations at a Local Veterans Affairs Dermatology Clinic,” *Cureus*, Vol. 13, 2021.
- [125] P. Broeder und H. Snijder, „Colour in Online Advertising: Going for Trust, Which Blue is a Must?” *Marketing - from information to decision journal*, Vol. 2, S. 5–15, 2019.
- [126] M. Kuniecki, J. Pilarczyk, und S. Wichary, „The color red attracts attention in an emotional context: An ERP study,” *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 9, 2015.
- [127] J. Chen, E. H. T. Teo, und K. Yao, „Electromechanical Actuators for Haptic Feedback with Fingertip Contact,” *Actuators*, Vol. 12, Nr. 3, 2023.
- [128] M. Wiertelwski, „Haptic feedback : from force-reflecting robots to tactile interfaces,” 2016, S. 502–506, In proc. of Actuator 2016.
- [129] F. Vidal-Verdu und M. Hafez, „Graphical Tactile Displays for Visually-Impaired People,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 15, Nr. 1, S. 119–130, 2007.
- [130] P. Kourtesis, F. Argelaguet, S. Vizcay, M. Marchal, und C. Pacchierotti, „Electrotactile Feedback Applications for Hand and Arm Interactions: A Systematic Review, Meta-Analysis, and Future Directions,” *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 15, Nr. 3, S. 479–496, 2022.

- [131] M. Kang, C.-G. Gang, S.-K. Ryu, H.-J. Kim, D.-Y. Jeon, und S. Pyo, „Haptic interface with multimodal tactile sensing and feedback for human–robot interaction,” *Micro and Nano Systems Letters*, Vol. 12, 2024.
- [132] R. Morales, I. Ezcurdia, J. Irisarri, M. Andrade, und A. Marzo, „Generating Airborne Ultrasonic Amplitude Patterns Using an Open Hardware Phased Array,” *Applied Sciences*, Vol. 11, Nr. 7, 2021.
- [133] T. Carter, S. Seah, B. Long, B. Drinkwater, und S. Subramanian, „UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces,” in *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM, 2013, S. 505–514.
- [134] B. Stroustrup, *The C++ programming language*. Addison-Wesley, 2013.
- [135] J. Gmys, T. Carneiro, N. Melab, E.-G. Talbi, und D. Tuytens, „A comparative study of high-productivity high-performance programming languages for parallel metaheuristics,” *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 57, 2020.
- [136] F. Cuvelier, C. Japhet, und G. Scarella, „An efficient way to assemble finite element matrices in vector languages,” *BIT*, Vol. 56, Nr. 3, S. 833–864, 2016.
- [137] A. Evans, M. Romeo, A. Bahrehmand, J. Agenjo, und J. Blat, „3D graphics on the web: A survey,” *Computers Graphics*, Vol. 41, S. 43–61, 2014.
- [138] M. Kleinman, „British tech star Ultraleap to halve workforce in break-up plan,” Zuletzt aufgerufen: 13.10.2025. [Online]. Verfügbar: <https://news.sky.com/story/british-tech-star-ultraleap-to-halve-workforce-in-break-up-plan-13159843?ref=uploadvr.com>